WUTP 现代陶瓷教科丛书

陶瓷矿物原料与岩相分析

刘属兴 主编

武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press



责任编辑/于应魁
封面设计/杨　涛

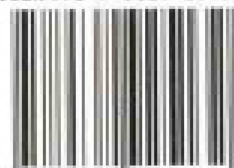
现代陶瓷教科丛书

先进陶瓷工艺学
建筑卫生陶瓷工艺学
陶瓷工业窑炉
窑炉砌筑与安装
陶瓷机械
科学研究与工程试验设计方法
陶瓷矿物原料与岩相分析
陶瓷烧成缺陷分析
陶瓷英语文献选读
日用陶瓷鉴别
陶瓷雕塑
雕塑造型与材料应用
陶瓷模型制作
中国陶瓷艺术史
陶瓷和服饰
传统陶瓷装饰——青花
传统陶瓷装饰——粉彩
传统陶瓷装饰——古彩
传统陶瓷装饰——新彩
陶瓷花纸设计与制作
现代陶艺教学

项目负责:武汉理工大学出版社第2工作室
地　址:武汉市洪山区珞狮路122号
电　话:(027)87884682
传　真:(027)87388543
http://www.techbook.com.cn
E-mail:wutpyyk@163.com

武汉理工大学出版社发行部
电话:(027) 87394412
传真:(027) 87397097

ISBN 978-7-5629-2513-2



定价:40.00元

现代陶瓷教科丛书

陶瓷矿物原料与岩相分析

主　编　刘属兴
副主编　顾幸勇
　　　　曹春娥
　　　　王艳香

武汉理工大学出版社

内容提要

本书包括结晶学、矿物学、岩石学基础、岩相学四大部分内容。结晶学着重介绍晶体及基本性质、晶体的形成、晶体的对称、晶体定向、单形和聚形及晶体内容构造的规律性；矿物学重点介绍矿物的概念、矿物的化学成分、矿物的物理性质、矿物的形态、矿物的分类，矿物各论中重点介绍与陶瓷工业有关的硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、氧化物和氢氧化物矿物及其他有关矿物，着重论述了它们在陶瓷工业中的应用，并列举了部分坯釉配方实例。岩石学基础介绍了岩浆岩、沉积岩、变质岩的基本理论及它们与陶瓷工业的关系。岩相学重点介绍了晶体光学基础、单偏光镜、正交偏光镜、锥光镜下晶体光学性质的测定。

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷矿物原料与岩相分析/刘属兴主编．—武汉：武汉理工大学出版社，2007.2
ISBN 978-7-5629-2513-2

Ⅰ．陶…
Ⅱ．刘…
Ⅲ．①陶瓷-矿物-原料　②陶瓷-矿物-岩相分析
Ⅳ．TQ174.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 017189 号

出版发行：武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号　邮政编码：430070)
http://www.techbook.com.cn
E-mail：wutpyyk@163.com
印 刷 者：武汉理工大印刷厂
经 销 者：各地新华书店
开　　本：787×1092　1/16
印　　张：26.25
字　　数：643 千字
版　　次：2007 年 2 月第 1 版
印　　次：2007 年 2 月第 1 次印刷
印　　数：1—3000 册
定　　价：40.00 元
凡购本书，如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请向出版社发行部调换。
本社购书热线电话：(027)87394412　87384503　87384729

前　　言

本书是“现代陶瓷教科丛书”之一，是根据高等院校无机非金属材料专业基础课程“硅酸盐岩相学”教学大纲编写的教材。

本书根据当前国内外陶瓷工业发展的趋势，结合无机非金属材料专业的教学要求，按照科学性、系统性和先进性的原则，吸收国内现有教材和有关书籍的有益内容，力求在先进性、科学性和实用性等方面有所体现。特别是根据高校教材应有利于自学的特点，在内容的安排和取舍上作了相应的变化，在取材上充分注意吸收当前的最新研究成果和生产实践经验，在理论和实践相结合方面有所突破。本书不仅可作为高校教材，也是一本能适应陶瓷工作者所需的极具参考价值的参考资料。

本书主要介绍了结晶学、矿物学、岩石学、岩相学的内容，并力求与陶瓷工业紧密结合。全书由景德镇陶瓷学院刘属兴担任主编，并编写了结晶学部分、矿物学部分、岩石学部分的内容，景德镇陶瓷学院顾幸勇教授、曹春娥教授编写了岩相学部分的内容，景德镇陶瓷学院王艳香博士参加编写了结晶学部分的内容。全书由刘属兴统稿，在统稿过程中，景德镇陶瓷学院周生娣、黄耀元老师参与了大量的资料收集和整理工作，编写过程中得到了景德镇陶瓷学院陈运华教授的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢！

由于资料收集尚欠详尽，加之编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，敬请专家和读者批评指正！

编　　者

2006 年 4 月

目　录

第一篇　结晶学基础

第二篇 矿物学

第三篇 岩石学基础

第四篇　岩相分析

第一篇　结晶学基础

1　晶体与非晶质体

在科学的领域内，人们把物质在空间所占据的有限部分称为物体。根据物体存在的状态不同，通常分为气体、液体和固体。

在固体中，由于内部结构的差别，可分为晶体（即晶质体）和非晶质体两类，非晶质体也叫做玻璃质。在自然界中，晶体不仅在矿物界中存在，而且在其他许许多多领域中也都广泛存在。天然的3300多种矿物中，晶体矿物占99%以上。陶瓷工业中所用到的矿物大多数是晶体，少数是非晶质体。

本章中，我们将重点介绍晶体的概念；晶体共同的规律——空间格子规律；晶体的基本性质。此外介绍非晶质体的概念以及晶体与非晶质体之间的相互转化关系。

1.1　晶体的概念

1.1.1　晶体的概念

在古代，无论中外，都把具有几何多面体形态的水晶（石英 SiO_2，见图1.1.1(*a*)）称为晶体。后来，这一概念推广了，凡是天然具有（非人工琢磨而成）几何多面体形态的固体，例如图1.1.1所示的石盐、方解石和磁铁矿等，都称为晶体。显然，这种认识还并不全面。例如，同样是一种石英物质，它既可以呈多面体形态的水晶而存在，也可以呈外形不规则的颗粒而生成于岩石之中。这两种形态的石英，从本质上来说是一样的。由此可见，自发形成几何多面体形态，只是晶体在一定条件下的一种外在表现。晶体的本质必须从它的内部去寻找。

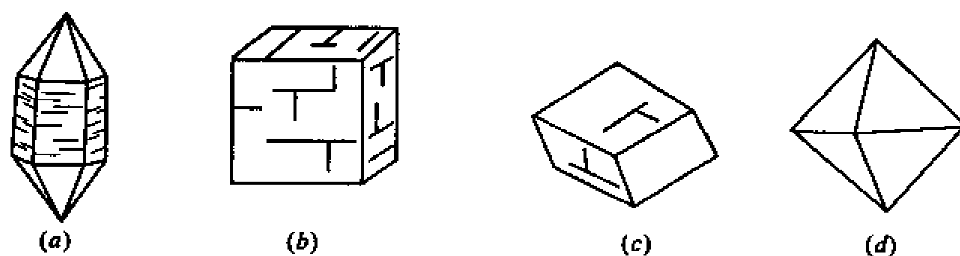


图1.1.1　石英 SiO_2(*a*)、石盐 NaCl(*b*)、方解石 $CaCO_3$(*c*)和磁铁矿 Fe_3O_4(*d*)晶体

近代应用X射线分析，揭示了大量晶体的内部结构。现已证明，一切晶体，不论其外形如何，它的内部质点（原子、离子或分子）都是作规律排列的。这种规律表现为质点在三维空间作周期性的平移重复，从而构成了所谓的格子构造（这一点将在下节详述）。因此，按照现代的概念，凡是质点作规律排列具有格子构造的物质即称为结晶质，结晶质在空间的有限部分即为晶体。由此可以得出，晶体是具有格子构造的固体。

但是，在自然界中，有些矿物晶体可以长成规则的几何多面体形态，而有些矿物晶体则因为颗粒太细，无法用肉眼去观察它的形态。此外，岩石中的绝大多数矿物不一定具有规则的几何多面体形态。如橄榄岩中的橄榄石晶体就是粒状。如花岗岩是由长石、石英、云母三种矿物

所组成，每一个矿物的颗粒都是一个晶体，但他们均很少呈多面体形态，特别是石英，由于它生长晚一些，在其生长过程中，已无自由空间任其生长，故往往呈不规则的外形，即使由一些同样晶体聚集生成的晶簇中，有的形态完整，有的不完整，甚至没有规则形态（如石英晶簇）。

在实验室内，如果我们把一个不具规则外形的石盐（NaCl）颗粒放在 NaCl 的过饱和溶液中，让它继续生长时，结果它也能长成立方体的规则几何外形，这说明具规则外形的石盐颗粒和不具规则外形的石盐颗粒，除外形外，两者所有的性质都是相同的。又如当石盐颗粒受力后，它的破裂都是有规律地沿着三个相互垂直的平面方向发生破裂（如图 1.1.2）。

通过以上所述，说明了仅仅从有无规则的几何外形来区分是否是晶体，这是不恰当的，所以，晶体的初步概念是不严格的。规则的多面体形态并不是晶体的本质，而只是一种外部现象。

事物的本质，要到它的内部去寻找，对晶体也是这样，它肯定还有某种内在的、本质的因素存在。

1.1.2 晶体是具有格子构造的固体

首先，我们来看石盐（NaCl）的晶体结构，这也是历史上人们第一个实际测定的具体的晶体结构，图 1.1.2(*a*)所表示的由一些大球（代表 Cl^- 离子）和小球（代表 Na^+ 离子）所堆成的立方体小块，仅是从石盐内部结构中剖取出来的最基本的部分。

沿着立方体棱的方向 Cl^- 和 Na^+ 总是相间排列的，且两个 Cl^-（或 Na^+）中心间的距离为 5.628Å（埃，$1Å=10^{-8}cm$）。而在平行于立方体的面对角线方向上，两个 Cl^-（或 Na^+）中心间的距离为 3.978Å，如图 1.1.2(*b*)所示，整个石盐内部结构都是这最基本部分的重复，因此，假如我们从任意一个 Cl^- 中心出发，在平行于立方体棱的方向上，每隔 5.628Å，就必定会遇到一个 Cl^- 的中心，当然，在这里并不限定必须要选择 Cl^- 的中心作为起始点，如果选择 Na^+ 的中心或者构造中其他任意位置上的一个点作为起始点都是可以的。



图 1.1.2 石盐（NaCl）的晶体结构

(*a*)NaCl 晶体的内部构造，大球—Cl^-，小球—Na^+；(*b*)由 NaCl 晶体结构抽象出的空间格子，∘—Cl^-，•—Na^+

由此可见，在石盐内部结构中，所有的 Cl^- 和 Na^+ 在三度空间的分布是有规律的，不是杂乱无章的，而质点分布的规律性又表现在相同的质点作有规律的周期性的重复。

在石盐晶体结构中，假若我们不看具体的质点，单纯从几何意义上来考虑，那么，它就是一个格子状构造。因此，也可说，石盐晶体内部构造中，质点在三维空间呈周期性重复的规则排列而构成一种格子状的构造。

石盐之所以能长成立方体的规则几何多面体外形，就是由它内部的这种格子构造所决定的，多面体外形仅是晶体内部本质的一种外在反映而已。

对于其他晶体，如正长石 $K[AlSi_3O_8]$、高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$，它们所包含的质量种

类更多，结构的具体形式也复杂得多，但是，任何一个晶体，不管它结构多么复杂，外形是否规则，情况都是完全类同的，即它们的内部质点在三度空间都是有规律地成周期性重复排列而构成格子状构造，这无一例外地为一切晶体所共同的性质。所不同的仅仅是：不同的晶体，它们的质点种类不同，排列的方式和间隔大小不同。

因此，晶体的确切的概念是：晶体是内部质点在三度空间成周期性重复排列的固体，或者说晶体是具有格子状构造的固体。

1.1.3 晶体的分布

晶体的分布是极为广泛的，除了在自然界矿物和岩石中绝大部分都是结晶物质之外，在实验室和工厂以及我们生活周围到处都有如食盐、白糖、钢铁、合金、陶瓷以及绝大多数固体化学药品。其中包括我国在世界上第一个用人工方法合成的蛋白质——结晶牛胰岛素等等都是晶体，因为，它们的内部结构均具有格子状构造，可以说，我们是生活在一个结晶的世界里。

晶体的大小差别很大，如原北京地质学院有一块水晶晶体重达 336.5kg，前苏联乌拉尔伊尔门山上有一个采石场，它的位置就座落在一个大天河石晶体上，但经常遇到的晶体是很小的，有些要用显微镜才能看到，甚至有的要用 X 射线或电子显微镜才能判断。

根据一些现代科学资料，认为其他天体也与地球相似，广泛分布着晶体。

1.2 空间格子

从晶体的定义可知，晶体内部的质点，在空间是作格子状排列的，称为空间格子。所以，空间格子是表示晶体构造规律性的几何图形。如图 1.1.3。

空间格子有如下几种要素：

1. 结点

结点是空间格子中的点，它们代表晶体结构中的相当点。在实际晶体中，在结点的位置上可为同种质点所占据。但就结点本身而言，它们并不代表任何质点，它们只有几何意义，为几何点。

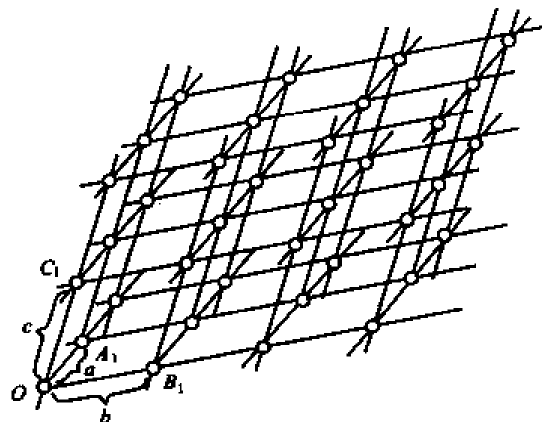


图 1.1.3 空间格子

2. 行列

结点在直线上的排列即构成行列（图 1.1.4）。空间格子中任意两个结点联结起来就是一条行列的方向。行列中相邻结点间的距离称为该行列的结点间距（如图 1.1.4 中的 a）。在同一行列中结点间距是相等的，在平行的行列上结点间距也是相等的；不同方向的行列，其结点间距一般是不等的，某些方向的行列上结点分布较密，而另一些则较稀（参看图 1.1.4）。

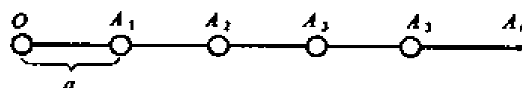


图 1.1.4 空间格子的行列

3. 面网

结点在平面上的分布即构成面网(图 1.1.5)。空间格子中不在同一行列上的任意 3 个结点就可以决定一个面网的方向,换句话说,也就是任意两个相交的行列就可决定一个面网。面网上单位面积内结点的密度称为面网密度。相互平行的面网,面网密度相同;互不平行的面网,面网密度一般不同。

4. 平行六面体

从三维空间来看,空间格子可以划出一个最小重复单位,那就是平行六面体(图 1.1.6)。它由 6 个两两平行而且相等的面组成。实际晶体结构中所划分出的这样的单位,称为晶胞。整个晶体结构可视为晶胞在三维空间平行地、毫无间隙地重复累叠。晶胞的形状与大小,则取决于它的 3 个彼此相交的棱的长度(图 1.1.6 中的 a、b、c)和它们之间的夹角(详见第 7 章)。

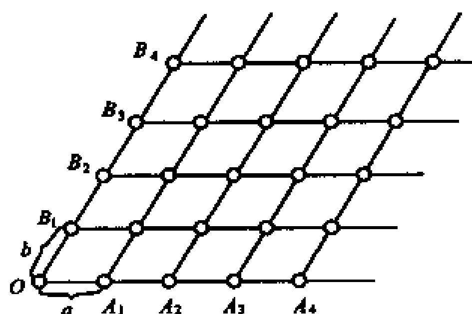


图 1.1.5 空间格子的面网

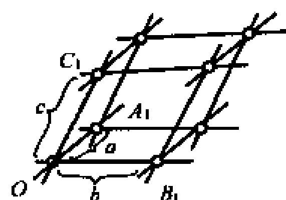


图 1.1.6 平行六面体

1.3 晶体的基本性质

由于晶体是具有格子构造的固体,因此,也就具备着为晶体所共有的、由格子构造所决定的基本性质。现简述如下。

1. 自限性

自限性是指晶体在适当条件下可以自发地形成几何多面体的性质。由图 1.1.1 可以看出晶体为平的晶面所包围,晶面相交成直的晶棱,晶棱会聚成尖的角顶。

晶体的多面体形态,是其格子构造在外形上的直接反映。晶面、晶棱、角顶分别与格子构造中的面网、行列及结点相对应,它们之间的关系如图 1.1.7 所示。

晶体多面体形态受格子构造制约,它服从于一定的结晶学规律。

2. 均一性

因为晶体是具有格子构造的固体,在同一晶体的各个不同部分,质点的分布是一样的,所以晶体的各个部分的物理性质与化学性质也是相同的,这就是晶体的均一性。

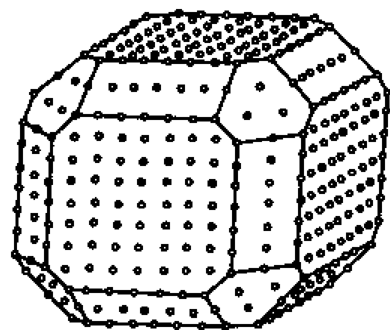


图 1.1.7 晶面、晶棱、角顶与面网、行列、结点的关系示意图

但必须指出的是,非晶质体也具有其均一性。如玻璃的不同部分折射率、膨胀系数、导热率等等都是相同的。但是如前所述,由于非晶质的质点排列不具有远程规律,即不具有格子构造,所以其均一性是统计的、平均近似的均一,称为统计均一

性；而晶体的均一性是取决于其格子构造的，称为结晶均一性。两者有本质的差别，不能混为一谈。液体和气体也具有统计均一性。

3. 异向性(各向异性)

同一格子构造中，在不同方向上质点排列一般是不一样的，因此，晶体的性质也随方向的不同而有所差异，这就是晶体的异向性。如蓝晶石(又名二硬石)的硬度随方向的不同而有显著的差别(图 1.1.8)，平行晶体延长的方向(图 1.1.8 中的 AA)可用小刀刻动，而垂直于晶体延长的方向(图 1.1.8 中的 BB)则小刀不能刻动。又如云母、方解石等矿物晶体，具有完好的解理，受力后可沿晶体一定的方向裂开成光滑的平面。在矿物晶体的力学、光学、热学、电学等性质中，都有明显的异向性的体现，这些将在矿物的物理性质一章中叙述。此外，如晶体的多面体形态也是其异向性的一种表现。

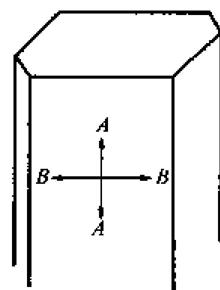


图 1.1.8　蓝晶石晶体的硬度 AA 与 BB 方向硬度不同

非晶质体一般是具有等向性的，其性质不因方向而有所差别。

4. 对称性

晶体具异向性，但这并不排斥在某些特定的方向上具有相同的性质。在晶体的外形上，也常有相等的晶面、晶棱和角顶重复出现。这种相同的性质在不同的方向或位置上作有规律的重复就是对称性。晶体的格子构造本身就是质点重复规律的体现。对称性是晶体极重要的性质，是晶体分类的基础，我们将以专门的章节加以讨论。

5. 最小内能

在相同的热力学条件下晶体与同种物质的非晶质体、液体、气体相比较，其内能最小。所谓内能，包括质点的动能与势能(位能)。动能与物体所处的热力学条件有关，温度越高，质点的热运动越强，动能也就越大，因此它不能直接用来比较物体间内能的大小。可能用来比较内能大小的只有势能，势能取决于质点间的距离与排列。

晶体是具有格子构造的固体，其内部质点是作有规律的排列的，这种规律的排列是质点间的引力与斥力达到平衡的结果。在这种情况下，无论使质点间的距离增大或缩小，都将导致质点的相对势能的增加。非晶质体、液体、气体由于它们内部质点的排列是不规律的，质点间的距离不可能是平衡距离，从而它们的势能也较晶体为大。也就是说在相同的热力学条件下，它们的内能都较晶体为大。实验证明，当物体由气态、液态、非晶质状态过渡到结晶状态时，都有热能的析出；相反，晶格的破坏也必然伴随着吸热效应。

现在我们把晶体的加热曲线(图 1.1.9)和非晶质体的加热曲线(图 1.1.10)对比如下。

当晶体加热时，起初温度是随着时间逐渐上升的。当达到某一温度，晶体开始熔解，同时温度的上升停顿了，此时所加的热量，用于破坏晶体的格子构造。直到晶体完全熔解，温度才开始继续上升。在温度停顿的时间内，晶体吸收了一定的热量而使自己转变为液体，这些热量称为熔解潜热。由于晶体的格子构造中各个部分的质点是按同一方式排列的，破坏晶体各个部分需要同样的温度。因此，晶体具有一定的熔点。

非晶质体则与之不同，由于它们不具有格子构造，所以它们没有一定的熔点。例如，将玻璃加热时，它首先变软，逐渐变为粘稠的熔体，最后变为真正的液体。在这一过程中没有温度的停顿，其加热曲线为一光滑的曲线。

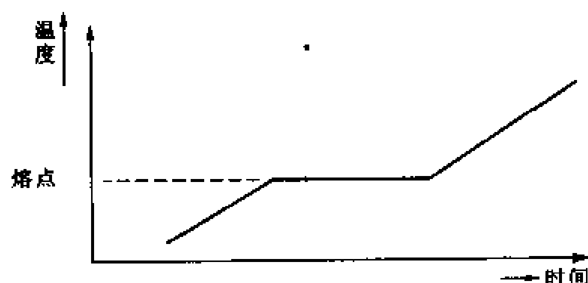


图 1.1.9　晶体的加热曲线

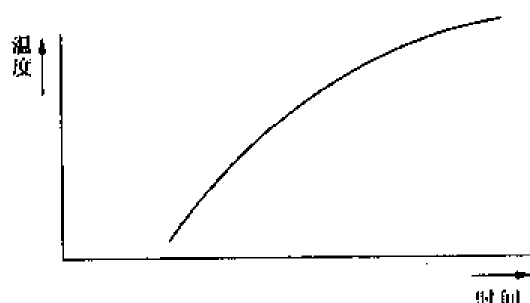


图 1.1.10　非晶质体的加热曲线

6. 稳定性

晶体由于有最小内能，因而结晶状态是一个相对稳定的状态。这就是晶体的稳定性，这一点可以由晶体与气体、液体中质点的运动状态的不同来说明。

在气体中，质点作直线的前进运动，质点运动的方向只有与其他质点相碰撞时才改变。因此，气体有扩散的性质，趋向于占有最大的体积。

在液体中，质点联系比在气体中紧密，质点运动时彼此不分离。质点的运动存在双重性，即质点一方面振动，同时质点的位置也在相对地移动。因此，液体可以流动，液体的形态决定于容器的形态。

晶体是具有格子构造的，质点只在其平衡的位置上振动，而不脱离其平衡位置。因此晶体是一个相对稳定的体系，结晶状态是一个相对稳定的状态，要使其向液态或气态转化，必须从外界传入能量。正是由于晶体具备了稳定性，才能使其格子构造以及其规律的几何外形得以保持。

固态非晶质体从质点运动的角度来看类似晶体，或把它视为粘度极大的液体。质点处于振动状态，质点的相对移动极为困难，但时间长了这种运动仍可以显现出来，在温度较高时，这种运动更为显著。因此非晶质体相对于晶体而言是不稳定的，有自发地向晶体转变的趋向。

1.4 非晶质体

1.4.1 非晶质体的概念

非晶质体是与晶体相对立的概念，它也是一种固态物体，但其内部质点在三度空间不成周期性的重复排列。因此，非晶质体不可能遵循为晶体所共同具有的空间格子规律，它也不可能具有为晶体所共有的那些基本性质。表现在外形上，它在任何条件下都不可能自发地长成规则的几何多面体，在内部结构上，其各个部分之间，仅仅在统计意义上是均一的，而在不同的方向上的性质则是同一的。

从内部结构的角度来看，非晶体中的质点分布类似于液体。以相同化学成分的石英和玻璃的内部结构来进行比较（图 1.1.11），在石英晶体中（图 1.1.11(*a*)）一种质点（黑点）周围的另一种质点（小圆圈）的排列是一样的，即每个黑点都被分布于三角形顶点的 3 个圆圈所围绕，而每个圆圈均居于以两个黑点为端点的直线的中央，这种规律叫做近程规律或短程有序。还可以看出，每种质点（黑点或圆圈）在整个图形中各自都呈现规律的周期性重复。把周期重复

的点用直线连接起来，可获得平行四边形网格。可以想象，在三维空间，这种网格将构成空间格子(参看图 1.1.3)。这种在图形中贯彻始终的规律称为远程规律或长程有序。但在非晶质体的玻璃体(图 1.1.11)中，质点虽然可以是近程有序的(每一黑点为 3 个圆圈围绕)，但不存在长程有序。在气体中则既不存在长程有序，也不存在近程有序。

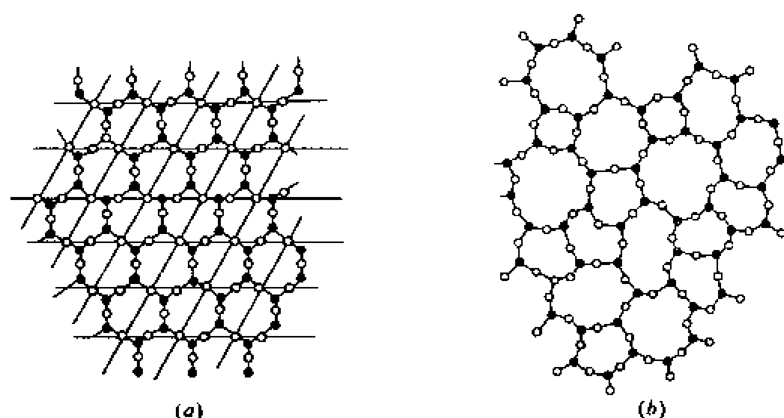


图 1.1.11 晶体(*a*)与非晶质体(*b*)结构示意图

所以，非晶质体在外部性质上是一种无定形的凝固态物体，在内部性质上则是统计上均一的各向同性体。其实，从这些方面的特性来看，非晶质体倒是更类似于液体，所以，非晶质体也可能被认为是过冷却的液体，或者说是硬化了的液体。当加热非晶质体时它将逐渐软化，最后变成液体，而没有固定的熔点。

不过，要在晶体与非晶质体之间划一绝对严格的界线是有困难的。在许多具有长链状分子的纤维类物质和高聚合物中，还存在着分子之间成一度的或二度的周期性重复排列的情况。显然，它们是介于晶体与非晶质体之间的过渡类型的物体。

非晶质体的分布远不如晶体那么广泛。在岩石、矿物的领域中，只有像琥珀、火山玻璃以及由于受到放射性蜕变的影响而玻璃化的一些放射性矿物(如褐钇铌矿、褐帘石等)属于非晶质体。此外，在其他领域中也只有诸如玻璃、塑料、树脂、沥青等少数物质属于非晶质的范畴，与结晶质相比，它们只占有极少部分。

1.4.2 非晶质体与晶体间的转化

晶体与非晶质体在一定的条件下是可以相互转化的。

非晶质体向晶体转化的作用我们称之为脱玻化或晶化作用。例如，由岩浆迅速冷凝而成的火山玻璃，在漫长的地质年代中，其内部质点进行着很缓慢的扩散，调整过程中，趋向于形成规则排列，亦即由非晶态逐渐地向着结晶态转变。使用年久的光学镜头，常会产生一些所谓的“霉点”，这也是由玻璃态向晶态转变。

若晶体因内部质点的规律排列遭到破坏而向非晶质体转变，则称为玻璃化或非晶化作用。例如一些含放射性元素的矿物，由于受到放射性蜕变时所发出的 X 射线的作用，晶格遭到破坏而转变成为非晶质矿物(但仍可保持原来的几何多面体外形)，这种因放射性蜕变而产生的非晶质，称为变生非晶质，变生非晶质矿物在高于室温的某个适当温度下保持一段时间后，则不可恢复成晶体。

2 晶体的形成

晶体是具有格子构造的固体。它的发生和成长，实质上是在一定的条件下组成物质的质点按照格子构造规律排列的过程。

2.1 晶体的形成方式

晶体是一个真正的固体，大多数的物质均能在一定条件下(温度、压力、组分浓度等)形成晶体，所以晶体的形成方式就是一种物质从一种物态转变为结晶状态的过程。

物态就是物质存在的状态，它有固态、液态和气态，根据物理化学上的研究，物态决定于温度、压力和组分浓度之间的相互关系，随着这3个因素的改变，物质存在的状态也就发生变化。

因此，根据物质的存在状态，晶体的形成方式有：由液体转变为晶体；由气体转变为晶体和由一种固体转变为晶体等三种方式。

2.1.1 由液体转变为晶体

由液体中结晶析出晶体，这种方式在自然界极为普遍，它可分为两种情况。

1. 从熔体中结晶

物质从熔体中结晶，在温度低于该物质的熔点时才能发生，也就是说只有熔体处于过冷却的条件下才能结晶。

例如融熔的金属熔体结晶成金属的晶体(冶金上钢件的浇铸，铁件的浇铸)，炽热的岩浆结晶成各种各样的岩石和矿物。

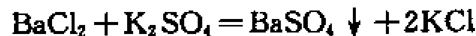
2. 从溶液中结晶

物质从溶液中结晶必须在过饱和的溶液中才能发生。溶液是通过下列方式来达到过饱和而生成晶体的。

①温度降低。低温时，物质的溶解度减小，形成过饱和状态，晶体即可生成，岩浆的逐渐冷却一部分亦能形成过饱和热液，也可形成晶体。

②水分蒸发。由于水分蒸发，溶质的量相对增加形成过饱和溶液，这种现象在自然界大规模存在着，如天然盐湖中因水分蒸发，盐类矿物(石盐、石膏、硼砂等)大量结晶出来，海边晒盐也是这个道理。

③起化学反应生成的难溶的物质晶体。即易溶盐类的饱和溶液，相互混合生成难溶盐的沉淀。如 $BaCl_2$ 和 K_2SO_4 的饱和溶液混合后，有 $BaSO_4$ 的结晶沉淀出来。



$$BaCl_2 + K_2SO_4 = BaSO_4 \downarrow + 2KCl$$

④外来物质的加入。如含饱和 SiO_2 的水溶液流到有石英颗粒的围岩中时(如花岗石)，则依围岩中石英颗粒长大成新的石英晶体。

2.1.2 由气体转变为晶体

由气体直接结晶成晶体，是气体物质不经过液体状态直接转变成固体的方式，产生这种作

用的条件是要有足够低的蒸气压。

例如火山爆发时在火山口附近及火山颈的壁上，直接由气体生成的石盐(NaCl)、碘(I)、硫(S)等晶体；寒冬时，所见的雪、霜和窗户玻璃上的冰花都是由气体生成晶体的例子。

2.1.3 由固体转变为晶体

此系固态物质不经过液体或气体状态，直接转变成另一种晶体的作用，它又有以下几种情况：

①同质多象转变。所谓同质多象转变是指某种晶体，在热力学条件改变时转变为另一种在新条件下稳定的晶体。它们在转变前后的成分相同，但晶体结构不同。如在573℃以上 SiO_2 可形成高温石英，而当温度降低到573℃以下时则转变为晶体结构不同的低温石英。

②原矿物晶粒逐渐变大。如由细粒方解石组成的石灰岩与岩浆岩接触时，受热再结晶成为由粗粒方解石晶体组成的大理岩。

③固溶体分解。在一定温度下固溶体可以分离成为几种独立矿物。例如由一定比例的闪锌矿(ZnS)和黄铜矿($CuFeS_2$)在高温时组成为均一相的固溶体，而在低温时就分离成为两种独立矿物。

④变晶。矿物在定向的压力方向上溶解，而在垂直于压力方向上再结晶，因而形成一向延长或二向延展的变质矿物，如角闪石、云母晶体等。这样的变质矿物称为"变晶"。有时在变质岩中发育成斑状晶体称为"变斑晶"。

⑤由固态非晶质结晶。火山喷发出的熔岩流迅速冷却，固结为非晶质的火山玻璃，火山玻璃经过漫长的地质年代，发生脱玻化而最终形成结晶质的石髓等矿物。

日常生活中，常用玻璃或光学玻璃经过一定时间后会结晶，变得混浊，甚至自动碎裂。

2.2 晶体的形成过程

由于一切晶体都是具有格子构造的固体，因此，晶体形成的过程，实质上就是物质质点按格子构造作有规律排列和堆积的过程。

晶体形成的过程大致可分为两个阶段，以从NaCl过饱和的溶液中形成晶体为例。

2.2.1 晶芽的形成(发芽)

晶芽(或称晶核)，是液体中物质结晶的中心，实质上仍是极其微小的微晶粒，它是作为晶体形成过程的第一步，液体中相应组分的质点按照格子构造形式首先聚合而成，在以后的结晶过程中，它们将成为晶体成长的中心。

晶芽可以自发形成，也可以非自发形成。

1. 自发形成晶芽

如在NaCl溶液中，有 Na^+、Cl^- 两种离子存在，它们杂乱地分布，而且作不规则的运动，它们时合时分，但在过饱和溶液中(降低温度或增加溶液的浓度均可形成)，带正、负电荷的 Na^+、Cl^- 动能减小，运动速度下降，则它们之间的引力作用增大，使他们彼此靠拢、相互结合，首先形成线晶(图1.2.1(*a*))，线晶的相互靠拢而成面晶(图1.2.1(*b*))，面晶的相互叠合而成结晶格子，即为晶芽，以后质点就向它不断粘附，晶体就长大起来了。

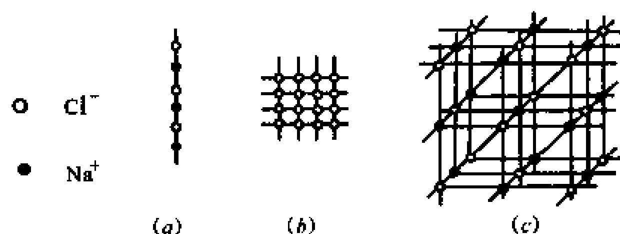


图 1.2.1
(a)线晶;(b)面晶;(c)晶芽

假若温度下降或浓度增大进行得很快,晶芽数目就多,反之就少。如果大量晶芽同时生长,结果便形成了数量多,而颗粒小的多晶体集合体,有时甚至可因冷却十分迅速而根本来不及形成晶芽便已完全固结,结果就形成了非晶质体物质。如岩浆喷出地表时就会形成像黑曜岩、珍珠岩这样的非晶质火山玻璃。

晶芽在不饱和溶液中也可能形成,但形成后很易又被溶解而消失,因而不饱和溶液中不能形成晶体。

2.非自发形成晶芽

所谓非自发形成晶芽,是指由外来的杂质、晶体的碎块、表面能够吸附溶质的胶点,甚至于气泡等成为溶液中物质的结晶中心。例如图 1.2.2(a)是以气泡为结晶中心所生成的石盐晶体,图 1.2.2(b)是在石英脉中,常见的以围岩壁上的同种晶体颗粒作为结晶中心而生长成石英晶体。它们有时可成为有工业价值的水晶晶体。另外,在人工培养晶体的工作中,通常都事先放入与溶质晶体相同的晶粒(称为籽晶),它就是一种巨大的非自发晶芽。

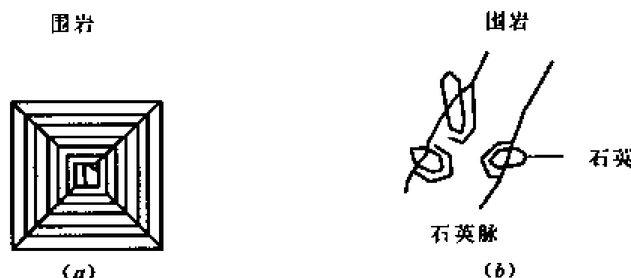


图 1.2.2
(a)石盐晶体以气泡为中心;(b)石英依附于围岩颗粒上长大

2.2.2 晶体的长大与科塞尔理论

在晶芽形成以后,接着就是溶液(或熔融体)中的质点按照格子构造不断地堆积到晶芽上去,使晶体得以成长,因此,晶体长大的过程实质上就是溶液(或熔体)中过剩质点向晶芽上粘附并按结晶格子扩大的过程。

但是,质点以何种方式和次序向晶芽上粘附?对于这个问题,不少学者根据不同的实践提出了不同的看法,我们重点介绍科塞尔理论,同时简要谈一下阶梯生长和螺旋生长理论。

1.科塞尔理论

又称科塞尔-斯特兰斯基理论,是科塞尔(德国学者)和斯特兰斯基(捷克学者)分别于

1927 年和 1928 年从不同的角度讨论了晶体成长的问题，二者有许多相似之处因而合并在一起，构成一个统一的理论，他们最早提出在理想条件下晶体成长的理论。

如图 1.2.3 所示，假设一个正在生长着的由单种原子所组成的立方格子晶体，那么在晶体表面，就存在着三种不同位置，每种位置各自有为数不等的若干个邻近的质点吸引它们，现在我们只根据距离最近的质点数作如下分析，因为较远者作用很小，可以忽略。

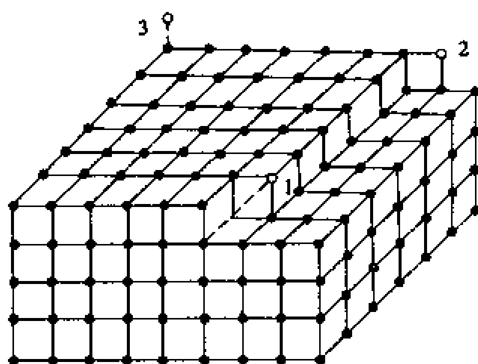


图 1.2.3 科塞尔关于晶体成长的图解

①位置 1，称三面凹角，新质点首先被吸附在具有三面凹角的 1 处，因为该处有 3 个最邻近的质点对它吸引，且吸引力最大。

②位置 2，称两面凹角，当不存在三面凹角位置时，新质点被粘附在具有两面凹角的 2 处，因为该处有两个最近邻的质点对它吸引，其吸引力较位置 1 次之。

③位置 3，当上述位置都没有时，新质点才被粘附在 3 处，此处只被晶体上最近邻的一个质点所吸引。

显然，在质点向晶芽堆积时将优先落到三面凹角 1 的位置上去，其次为两面凹角 2 的位置，最后才在一般位置 3 上进行堆积。

同时，从图 1.2.3 中能看到，当有一个质点堆到 1 的位置上后，三面凹角并不因而消失，而只是向前移动了一个位置，如此逐渐地往前移动，一直要到整个行列都被填满之后，三面凹角才归于消失，此时质点将在任一两面凹角的位置上堆积，而且一旦堆上一个以后，立即导致三面凹角重又出现，一直到该行列全被堆满后它才再次消失，如此一个行列，一个行列地进行，不断向右推进，直到堆满该层面网为止，此时，三面凹角和两面凹角都消失，质点将只能堆积在任意的一般位置上，但一旦堆上后接着就会有两面凹角产生，随后又有三面凹角的形成。于是又将重复上述的过程，直至又长完一层面网为止。

所以，科塞尔理论是：晶体在理想的情况下（指晶体与所在的溶液处于完全平衡的状态，温度较低，同时是以晶芽为单种原子所组成的立方格子为前提），其长大过程是质点以一个一个的方式往晶芽上粘附，次序是先长一条行列再长相邻的行列，生长满一层面网再长第二层面网，面网层层平行地向外推移。

科塞尔理论具有较大的意义，它可以解释晶体如何长成面平棱直的多面体形态，晶体产生环带构造的原因以及晶面间夹角不变（即面角恒等定律）的道理。

但是，自然界中的环境和条件总是千变万化的，晶体生长的实际情况却比科塞尔理论要复杂得多，总是或多或少地偏离理想条件的，所以，实际晶体生长过程不可能严格地如上述那样面网逐层地向外推移，它可能会出现这样的情况：

①由于已经长满了面网上的质点对溶液质点的引力较小，因此，形成一个完整的新面网是相当困难的，即不能按一层一层顺序堆积，而是一层未完，上面一层又堆起。

②另一方面，如果溶液过饱和程度很高，溶液中形成线晶、面晶、晶芽的机会就多，这就完全可能出现以线晶、面晶、晶芽等方式往生长着的晶体上粘附的现象。

因此，为了弥补科塞尔理论之不足，一些学者根据实验观察又提出了阶梯状生长、螺旋生长等理论。

2. 晶体阶梯状生长理论

前苏联学者安舍利斯于1943年根据晶面上出现阶梯现象，提出晶体阶梯状成长的理论，认为晶体成长时不是一个一个质点附加，而是一块一块地附着，即一次沉淀在一个晶面上的物质层的厚度可达几万或几十万个分子层（$10^4 \sim 10^5$ Å），浓度高，温度低，层次愈厚，同时也不是一层一层地顺序堆积，而是一层未完，上面一层又堆起，这样连续进行下去，结果造成晶体表面不平坦而形成阶梯状。

具体地说晶体长大的情况是这样：随着晶体的长大，溶质供应的不均匀性将逐渐变得明显起来，那么，相对来说角顶附近接受溶质的机会最多，晶棱附近次之，晶面中心则最小。因此，质点将优先在晶棱和角顶部位堆积。于是，在晶体成长过程中，首先将在其棱角部位堆上成团的质点团，形成一个小突起 *ABEF*（图 1.2.4(*a*)）（形成小突起后，即按科塞尔理论进行堆积），此时，在此小突起的前方就产生了凹角，于是质点就优先向凹角堆积，并形成一个斜坡（图 1.2.4(*a*)中按 1、2、3 的次序堆积后即形成斜坡 *EG*），但斜坡形成后，凹角并未消灭，从而质点还继续向前堆积，亦即斜坡平行地向前推移直到长完这一厚层面网为止。

不过，一般往往是在第一个突起还在向前推移，尚未消失的时候，在它的基础上又形成了第二个、第三个……新的突起，结果，整个成长过程就成为一系列互相平行，但层层高起而呈阶梯状分布的斜坡（斜坡向溶液或熔体流动方向使阶梯面间的凹角成为永远大于90°的钝角），同时又平行向前推进，如图 1.2.4(*b*)，而且，当老的一系列阶梯状的斜坡归于消失的时候，新的又产生了，因而这样的阶梯永远不能被完全消灭。这样，当晶体生长停止时，晶面上的阶梯即被保留下来，形成晶面上的生长条纹。

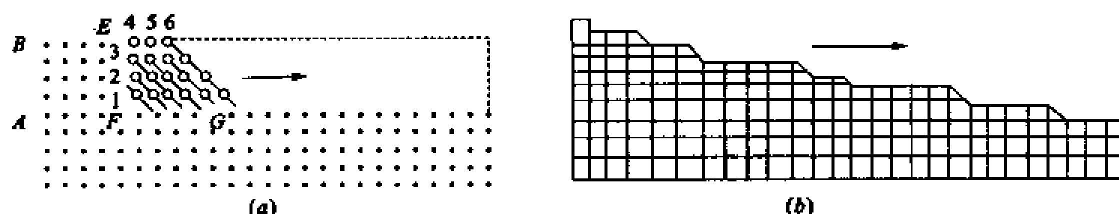


图 1.2.4　晶体阶梯状生长的示意剖面图

(*a*)一个阶梯中质点数堆积次序；(*b*)若干个阶梯同时向前平行推移

许多实际晶体上晶面条纹的存在，可作为晶体呈阶梯状生长过程的实际证据。

3. 螺旋生长理论

这一理论是由前苏联学者列姆列英提出并阐明的。

这一理论认为，晶体在生长过程中，由于多种原因在晶体中产生位错（在实际晶体的内部结构中，经常可存在各种不同形式的缺陷，其中有一种就是螺旋位错），位错的产生，一般认为，在晶体生长的初期，质点是按理想生长的情况堆积的，但随着质点的不断堆积，由于杂质或热应力的不均匀分布，使晶格内部产生了内应力，当内应力积累到超过一定的限度时，晶格便沿着某个面网发生相对剪切位移，如果这种均匀的剪切位移是陡然截止的，则在截止处将形成一条位错线而出现了螺旋位错，如图 1.2.5 所示。晶体结构中一旦产生了位错，就必然会出现两面凹角，从而溶液中质点优先在两面凹角处堆积，从该图中还可看出，在具有螺旋位错的结构中，凹角永远不会因质点的不断堆积而消失，仅仅是凹角所在的位置随着质点的堆积而不断地螺旋上升，导致整个晶面逐层地向外推移，使晶面成螺旋状生长，如图 1.2.6 所示。所以，在实际晶面上有时可看到螺旋状的花纹，即晶面螺纹，这就是晶体呈螺旋生长的实际证据。

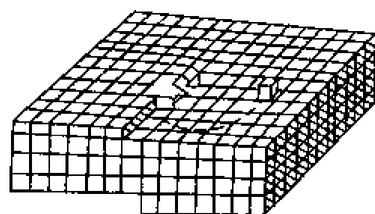


图 1.2.5 晶体的位错(螺旋位错)

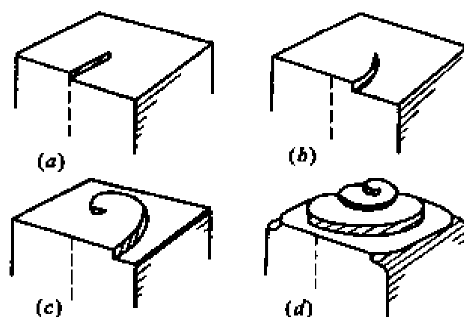


图 1.2.6 晶体螺旋状生长示意图

目前有关螺旋生长的一些实验资料，主要是在气相结晶的过程中观察到的，由液相转变成固相的方式只有实际观察材料，此外，在晶体溶解过程中也取得负螺纹（反螺纹）的图像（指螺纹凹入晶体内部，而非凸出晶面以外），纵使如此，它们均可证实螺旋生长理论的可靠性。

至此，有关解释晶体成长的科塞尔理论以及阶梯状生长和螺旋生长理论都未能达到独自完善的程度，实际中，它们往往要相互配合、取长补短来解释各种现象。

2.3 晶面的生长速度和布拉维法则

2.3.1 晶面生长速度

晶体在生长的过程中，根据科塞尔理论，晶面是平行地向外推移的，但是，在不同的情况下，其向外推移的快慢不一样，即晶面生长速度是不同的。

晶面生长速度可分为两种：一为垂直方向的速度，即垂直晶面的法线方向的速度。一为横切方向的速度，即具体指晶面生长的大小，它往往取决于晶面间的相互几何关系和晶面本身的垂直生长速度。

通常是把垂直方向的速度称为晶面生长速度，它的定义是：在单位时间内，晶面在其法线方向上向外推移的距离（所长的厚度）。

如图 1.2.7 中，不但可以看出晶面依据科塞尔理论平行地向外推移，并且可知各晶面向外推移的距离不完全相等，晶面 b、c 向外推移距离比晶面 a、d 要大。

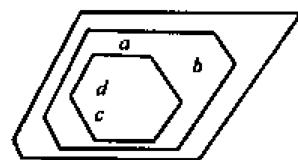


图 1.2.7 晶面生长速度

因此，我们研究晶面的生长速度对于晶体形态的分析就具有很重要的意义，生长速度快的晶面（图 1.2.7 中 b 和 c），在生长过程中逐渐缩小，以至消失；生长速度慢的晶面（图 1.2.7 中 a 和 d）在生长过程中逐渐扩大而保留，其结果因相对生长速度不同，决定了晶体的形态特征。

2.3.2 布拉维法则

早在 1855 年，法国结晶学家布拉维（A. Bravis）从晶体具有空间格子构造的几何概念出发，论述了实际晶面与空间格子构造中面网之间的关系，即实际晶体的晶面常常平行网面结点密度最大的面网，这就是布拉维法则。

布拉维的这一结论是根据晶体上不同晶面的相对生长速度与网面上结点的密度成反比的

推论而得出的。所谓晶面生长速度是指单位时间内晶面在其垂直方向上增长的厚度。如图1.2.8所示，晶面 AB 的网面上结点的密度最大，网面间距也最大，网面对外来质点的引力小，生长速度慢，晶面横向扩展，最终保留在晶体上；CD 晶面次之；BC 晶面的网面上结点密度最小，网面间距也就小，网面对外来质点引力大，生长速度最快，横向逐渐缩小以致晶面最终消失。因此，实际晶体上的晶面常是网面上结点密度较大的面。

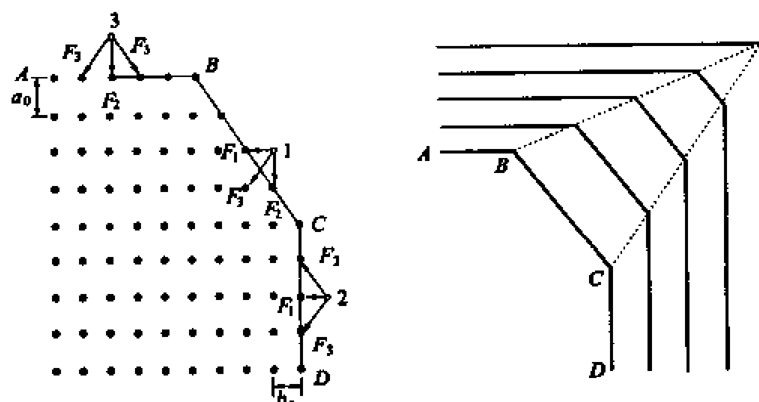


图 1.2.8　晶体构造中网面密度与生长速度关系图解

总体看来，布拉维法则阐明了晶面发育的基本规律。但由于当时晶体中质点的具体排列尚属未知，布拉维所依据的仅是由抽象的结点所组成的空间格子，而非真实的晶体结构。因此，在某些情况下可能会与实际情况产生一些偏离。1937 年美国结晶学家唐内·哈克(Dcnnay·Harker)进一步考虑了晶体构造中周期性平移(体现为空间格子)以外的其他对称要素(如螺旋轴、滑移面)对某些方向面网上结点密度的影响，从而扩大了布拉维法则的适用范围。

布拉维法则的另一不足之处是，只考虑了晶体的本身，而忽略了晶体生长的介质条件。

2.4　影响晶体生长的外部因素

决定晶体生长的形态，内因是基本的，而生成时所处的外界环境对晶体形态的影响也很大。同一种晶体在不同的条件下生长时，晶体形态可能是有所差别的。现就影响晶体生长的几种主要的外部因素分述如下。

1. 涡流

在生长着的晶体周围，溶液中的溶质向晶体粘附，其本身浓度降低以及晶体生长放出热量，使溶液密度减小。由于重力作用，轻溶液上升，远处的重溶液补充进来，从而形成了涡流。涡流使溶液物质供给不均匀，有方向性，同时晶体所处的位置也可能有所不同，如悬浮在溶液中的晶体下部易得溶质的供应，而贴着基底的晶体底部得不到溶质等等，因而生长形态特征不同。为了消除因重力而产生的涡流，现已在人造地球卫星的失重环境中试验晶体的生长。

2. 温度

在不同的温度下，同种物质的晶体，其不同晶面的相对生长速度有所改变，影响晶体形态，如方解石($CaCO_3$)在较高温度下生成的晶体呈扁平状，而在地表水溶液中形成的晶体则往往是细长的。石英和锡石矿物晶体亦有类似的情况。

3. 杂质

溶液中杂质的存在可以改变晶体上不同面网的表面能，所以其相对生长速度也随之变化

而影响晶体形态。例如，在纯净水中结晶的石盐是立方体，而在溶液中有少量硼酸存在时则出现立方体与八面体的聚形(图 1.2.9)。

4. 粘度

溶液的粘度也影响晶体的生长。粘度的加大，将妨碍涡流的产生，溶质的供给只有以扩散的方式来进行，晶体在物质供给十分困难的条件下生成。由于晶体的棱角部分比较容易接受溶质，生长得较快，晶面的中心生长得慢，甚至完全不长，从而形成骸晶。

骸晶亦可在快速生长的情况下生成，如图 1.2.10 所示的石盐的骸晶。还有一些骸晶则是因凝华而生成的，如图 1.2.11 之雪花。

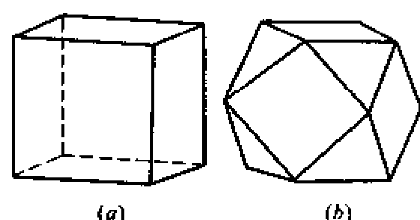


图 1.2.9 杂质对石盐晶形的影响
(a)纯水中生成的 NaCl 晶形；
(b)含有少量硼酸的溶液中生成的 NaCl 晶形

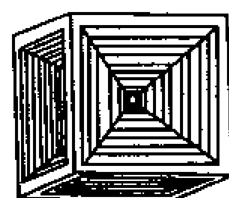


图 1.2.10 石盐的骸晶

5. 结晶速度

结晶速度快，则结晶中心增多，晶体长得细小，且往往长成针状、树枝状；反之，结晶速度慢，则晶体长得粗大。如岩浆在地下缓慢结晶，则生长成粗粒晶体组成的深成岩，如花岗岩；但在地表快速结晶则生成由细粒晶体甚至于隐晶质组成的喷出岩，如流纹岩。结晶速度还影响晶体的纯净度。快速结晶的晶体往往不纯，包裹了很多杂质。

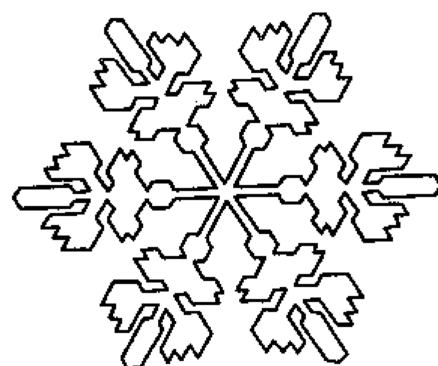


图 1.2.11 雪花

影响晶体生长的外部因素还有很多，如晶体析出的先后次序也影响晶体形态，先析出者有较多自由空间，晶形完整，成自形晶；较后生长的则形成半自形晶或他形晶。同一种矿物的天然晶体于不同的地质条件下形成时，在形态上、物理性质上都可能显示不同的特征，这些特征是晶体生长环境的标志性特征，称为标型特征。

2.5 晶体的溶解与再生

1. 晶体的溶解

把晶体置于不饱和溶液中晶体就开始溶解。由于角顶和棱与溶剂接触的机会多，所以这些地方溶解得快些，因而晶体可溶成近似球状。如明矾的八面体溶解后成近于球形的八面体(图 1.2.12)。

晶面溶解时，将首先在一些薄弱地方溶解出小凹坑，称为蚀象。经在镜下观察，这些蚀象是由各种次生小晶面组成的。图 1.2.13 表示方解石(*a*)与白云石(*b*)晶体上的蚀象。不同网面密度的晶面溶解时，网面密度大的晶面先溶解，因为网面密度大的晶面网面间距大，容易破坏。

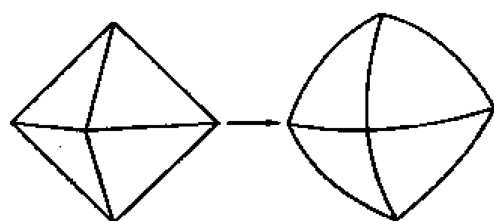


图 1.2.12 明矾的溶解晶体

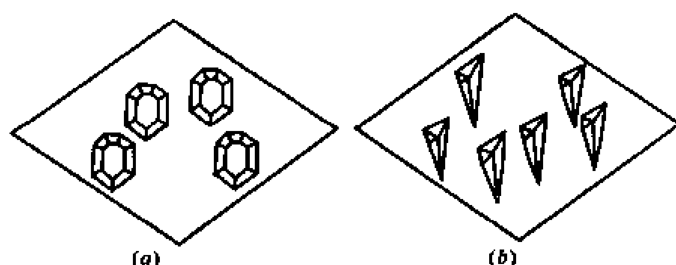


图 1.2.13 方解石(*a*)和白云石(*b*)的蚀象

2. 晶体的再生

破坏了的和溶解了的晶体处于合适的环境又可恢复多面体形态，称为晶体的再生(图 1.2.14)，如斑岩中石英颗粒的再生(图 1.2.15)。

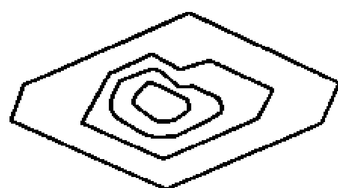


图 1.2.14 晶体的再生

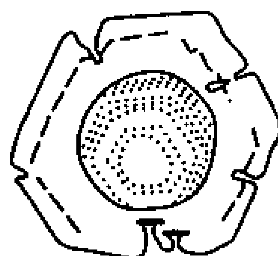


图 1.2.15 石英颗粒的再生

溶解和再生不是简单的相反的现象。晶体溶解时，溶解速度是随方向逐渐变化的，因而晶体溶解可形成近于球形；晶体再生时，生长速度随方向的改变而突变，因之晶体又可以恢复成几何多面体形态。

晶体在自然界的生长往往不是直线型进行的，溶解和再生在自然界常交替出现，使晶体表面呈复杂的形态。如在晶体上生成一些窄小的晶面，或者在晶面上生成一些特殊的突起和花纹。

2.6 人工合成晶体

对天然矿物晶体生长的研究有助于了解矿物、岩石、地质体的形成及发展历史，并为矿物资源的开发和利用提供一些有益的启发性资料。人工合成晶体则不仅可以模拟和解释天然矿物的形成条件，更重要的是能够提供现代科学技术所急需的晶体材料。

近年来人工合成晶体实验技术迅速发展，成功地合成了大量重要的晶体材料，如激光材料、半导体材料、磁性材料、人造宝石以及其他多种现代科技所要求的具有特种功能的晶体材料。当前人工合成晶体已成为工业主要支柱的材料科学的一个重要组成部分。

人工合成晶体的主要途径是从溶液中培养和在高温高压下通过同质多象的转变来制备(如用石墨制备金刚石)等。具体方法很多，下面简要介绍几种最常用的方法。

1. 水热法

这是一种在高温高压下从过饱和热水溶液中培养晶体的方法。用这种方法可以合成水晶、刚玉(红宝石、蓝宝石)、绿柱石(祖母绿、海蓝宝石)、石榴子石及其他多种硅酸盐和钨酸盐等上百种晶体。

晶体的培养是在高压釜(图 1.2.16)内进行的。高压釜由耐高温高压和耐酸碱的特种钢材制成。上部为结晶区,悬挂有籽晶;下部为溶解区,放置培养晶体的原料,釜内填装溶剂介质。由于结晶区与溶解区之间有温度差(如培养水晶,结晶区为 330～350℃,溶解区为 360～380℃)而产生对流,将高温的饱和溶液带至低温的结晶区形成过饱和析出溶质使籽晶生长。温度降低并已析出了部分溶质的溶液又流向下部,溶解培养料,如此循环往复,使籽晶得以连续不断地长大。

2. 提拉法

这是一种直接从熔体中拉出单晶的方法。其设备如图 1.2.17 所示。熔体置坩埚中,籽晶固定于可以旋转和升降的提拉杆上。降低提拉杆,将籽晶插入熔体,调节温度使籽晶生长。提升提拉杆,使晶体一面生长,一面被慢慢地拉出来。这是从熔体中生长晶体常用的方法。用此法可以拉出多种晶体,如单晶硅、白钨矿、钇铝榴石和均匀透明的红宝石等。

3. 焰熔法

这是一种用氢氧火焰熔化粉料并使之结晶的方法。图 1.2.18 为此法的示意图。小锤 1 敲打装有粉料的料筒 2,粉料受振动经筛网 3 而落下,氧经入口 4 进入将粉料下送,5 是氢的入口,氢和氧在喷口 6 处混合燃烧,粉料经火焰的高温而熔化并落于结晶杆 7 上,控制杆端的温度,使落于杆端的熔层逐渐结晶。为使晶体生长有一定长度,可使结晶杆逐渐下移。用这种方法成功地合成了如红宝石、蓝宝石、尖晶石、金红石、钛酸锶、钇铝榴石等多种晶体。

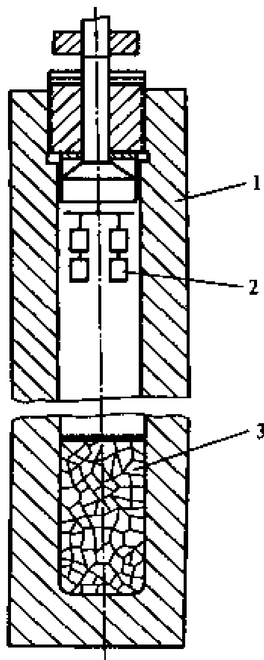


图 1.2.16 水热法培养晶体的装置

1. 高压釜;2. 籽晶;
3. 培养晶体的原料

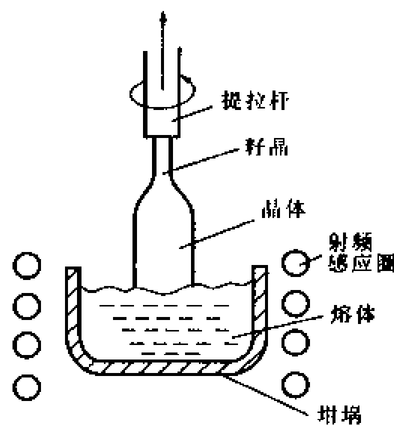


图 1.2.17 提拉法示意图

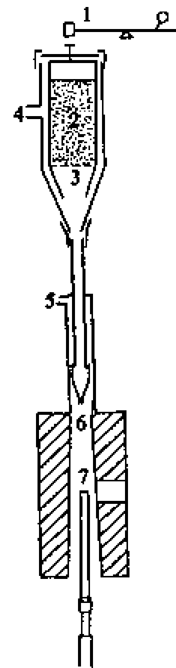


图 1.2.18 焰熔法示意图

3　晶体的对称

3.1　对称的概念

对称的现象在自然界和我们日常生活中都很常见。如蝴蝶(图 1.3.1)、花冠(图 1.3.2)等动植物的形体以及某些用具、器皿，都常呈对称的图形。

显然对称的图形必须由两个以上的相同的部分组成。但是，只具有相同的部分还不一定是对称的图形。如图 1.3.3 是由两个全等的三角形组成，但它并不是对称图形。因此，对称的图形还必须符合另一个条件，那就是这些相同的部分，通过一定的操作(如旋转、反映、反伸)可以发生重复；换句话说也就是相同的部分通过一定的操作彼此可以重合起来，使图形恢复原来的形象。如图 1.3.1 蝴蝶的两个相同的部分可以通过垂直平分它的镜面的反映，彼此重合；图 1.3.2 的花冠通过围绕一根垂直它并通过它中心的直线旋转，可以多次重复其原来的形象。

对称就是物体相同部分有规律的重复。

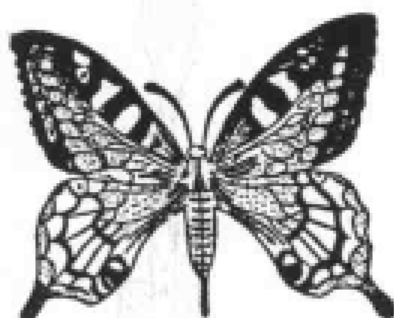


图 1.3.1　蝴蝶的对称



图 1.3.2　对称的花冠

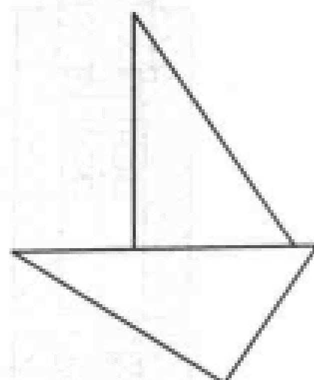


图 1.3.3　不对称的图形

3.2　晶体对称的特点

晶体是具有对称性的，晶体的对称最直观的表现在晶体外形上相同的晶面、晶棱和角顶作有规律的重复。

晶体的对称与其他物体的对称不同。生物的对称是为了适应生存的需要，经过长期转化的结果；建筑物、用具和器皿的对称是人为的，是为了美观和适用，它们的对称仅仅表现在外部形态上；而晶体的对称取决于它内在的格子构造。因此，晶体的对称具有如下的特点：

①所有的晶体都具有对称性。由于晶体内部都具有格子构造，而格子构造本身就是质点在三维空间周期重复的体现，因此，从这种意义来说，所有的晶体都具有对称性。晶体的对称，

不仅外部形态上对称，而且晶体内部结构也是对称的，即微观的对称。本章主要探讨晶体外形的宏观对称。

②晶体的对称受格子构造规律的限制。也就是说只有符合格子构造规律的对称才能在晶体上体现。因此，晶体的对称是有限的，它遵循“晶体对称定律”(见对称轴一节)。

③晶体的对称取决于其内在的本质——格子构造，因此，晶体的对称不仅体现在外形上，同时也体现在物理性质(如光学、力学、热学、电学性质等)和化学性质上；也就是说晶体的对称不仅包含着几何意义，也包含着物理意义。

正是由于以上的特点，所以晶体的对称可以作为晶体分类的最好的依据。在矿物学中，无论在矿物的内部结构、外部形态或物理性质的研究中，晶体对称性都得到了极为广泛的应用。

3.3 对称操作和对称要素

欲使对称图形中相同部分重复，必须通过一定的操作，这种操作就称之为对称操作。例如，欲使图 1.3.1 中蝴蝶的两个相等的部分重复，必须凭借一个镜面的“反映”；欲使图 1.3.2 的花瓣重复，必须使花冠围绕一根直线“旋转”等。

在进行对称操作时所凭借的辅助几何要素(点、线、面)称为对称要素。

晶体外形可能存在的对称要素和相应的对称操作如下。

1. 对称面(P)

对称面是一个假想的平面，相应的对称操作为对于此平面的反映。它将图形平分为互为镜像的两个相等部分。

图 1.3.4(a)中 P_1 和 P_2 都是对称面(垂直纸面)，因为它们都可以把图形 $ABDE$ 平分成两个互为镜像的相等部分；但图 1.3.4(b)中之 AD 则不是图形 $ABDE$ 的对称面，因为它虽然把图形 $ABDE$ 平分为△AED 与△ABD 两个相等部分，但这两者并不是互为镜像的，△AED 的镜像是△AE_1D。

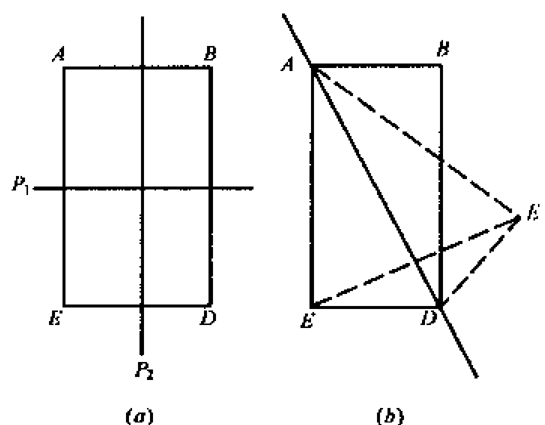


图 1.3.4　P_1 和 P_2 为对称面(a)，AD 为非对称面(b)

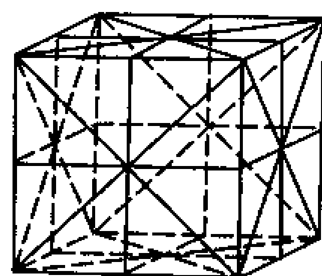


图 1.3.5　立方体的九个对称面 9P

晶体中对称面与晶面、晶棱可能有如下关系：

①垂直并平分晶面；

②垂直晶棱并通过它的中心；

③包含晶棱。

对称面以 P 表示，在晶体中可以没有或有一个或几个对称面。在描述中，一般把对称面的数目写在符号 P 的前面，如立方体有 9 个对称面(图 1.3.5)，记作 $9P$。

2. 对称轴(L^n)

对称轴是一根假想的直线，相应的对称操作是围绕此直线的旋转。当图形围绕此直线旋转一定角度后，可使相等部分重复。旋转一周重复的次数称为轴次(n)。重复时所旋转的最小角度称基转角 α，两者之间的关系为 $n=360°/\alpha$。

对称轴以 L 表示，轴次 n 写在它的右上角，写作 L^n。

晶体外形上可能出现的对称轴如表 1.3.1 所列。

表 1.3.1 晶体外形上可能出现的对称轴

名 称	符 号	基转角	作图符号
一次对称轴	L^1	360°	
二次对称轴	L^2	180°	⬮
三次对称轴	L^3	120°	▲
四次对称轴	L^4	90°	◆
六次对称轴	L^6	60°	⬤

一次对称轴 L^1 无实际意义，因为晶体围绕任一直线旋转 360°都可以恢复原状。轴次高于 2 的对称轴，即 L^3、L^4、L^6 称高次轴。

图 1.3.6 举例绘出了晶体中的对称轴 L^2、L^3、L^4 和 L^6。

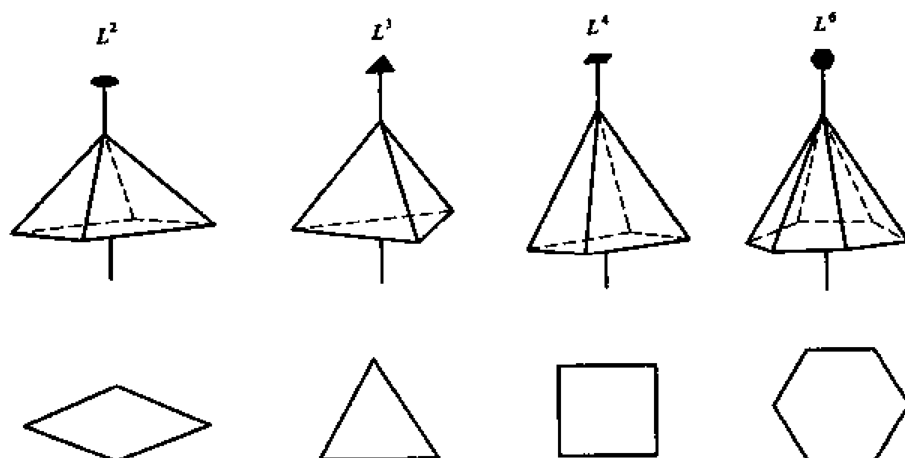


图 1.3.6 晶体中的对称轴 L^2、L^3、L^4 和 L^6 举例

晶体中不可能出现五次或高于六次的对称轴。这是由于它们不符合空间格子的规律。在空间格子中，垂直对称轴一定有面网存在，围绕该对称轴转动所形成的多边形应该符合于该面网上结点所围成的网孔。从图 1.3.7 可以看出，围绕 L^2、L^3、L^4、L^6 所形成的多边形，都能毫无间隙地布满平面，都可能符合空间格子的网孔。但垂直 L^5、L^7 和 L^8 所形成的正五边形、正七边形和正八边形却不能毫无间隙地布满平面，不符合空间格子的网孔，所以在晶体中不可能存在五次及高于六次的对称轴，这一规律，称为晶体的对称定律。

在一个晶体中，可以没有也可以有一种或几种对称轴，而每一种对称轴也可以有一个或多个。如立方体有 $3L^44L^36L^2$(图 1.3.8)。在晶体中，对称轴可能出露的位置为晶面的中心、晶棱的中点或角顶(图 1.3.8)。

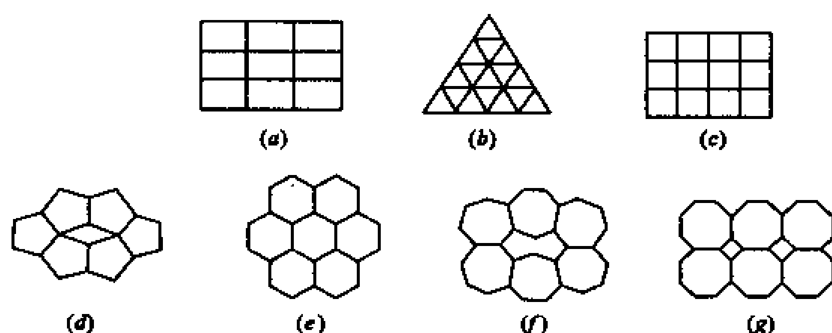


图 1.3.7 垂直对称轴所形成的多边形网孔

(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)分别表示垂直 L^2、L^3、L^4、L^5、L^6、L^7、L^8 的多边形网孔，五、七、八边形网孔不能无间隙地排列

3. 对称中心(C)

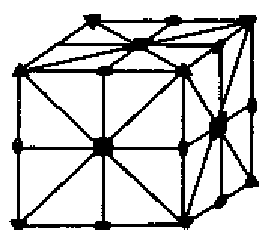


图 1.3.8 立方体的 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$

对称中心是一个假想的点。相应的对称操作是对此点的反伸(或称倒反)。如果通过此点作任意直线，则在此直线上距对称中心等距离的两端，必定可以找到对应点。

对称中心以字母 C 来表示。

图 1.3.9 是一个具有对称中心的图形，C 点为对称中心。在通过 C 点所作的直线上，距 C 等距离的两端可以找到对应点，如 A 和 A_1、B 和 B_1；也可以这样说，取图形中任意一点 A 与对称中心作连线，再由 C 点向相反方向延伸等距离，必然能找到对应点 A_1。

一个具有对称中心的图形，其相对应的面、棱、角都体现为反向平行。如图 1.3.10(a)，C 为对称中心，$\triangle ABD$ 与 $\triangle A_1B_1D_1$ 为反向平行；图 1.3.10(b)因$\square ABA'B'$与$\square A_1B_1A'_1B'_1$ 各自尚存在对称中心，所以两者既为反向平行，也为正向平行。

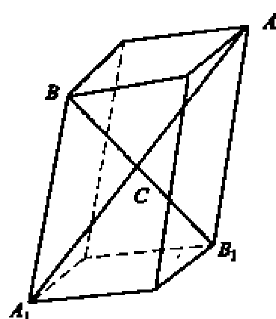
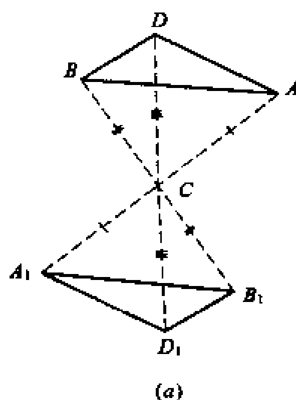


图 1.3.9 具有对称中心(C)的图形

A 与 A_1、B 与 B_1 为对应点



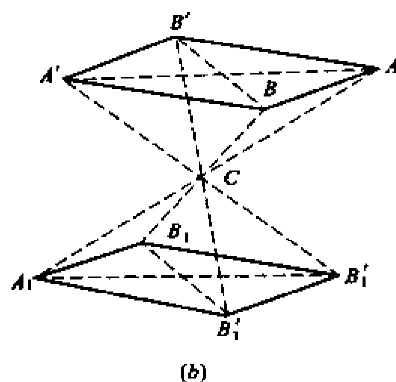


图 1.3.10 由对称中心联系起来的两个反向平行的三角形(a)和平行四边形(b)

在晶体中，若存在对称中心时，其晶面必然都是两两平行且相等的。这一点可以用来作为判别晶体或晶体模型有无对称中心的依据。

4. 旋转反伸轴(L_i^n)

旋转反伸轴是一根假想的直线。相应的对称操作是围绕此直线的旋转和对此直线上的一

个点反伸的复合操作。图形围绕此直线旋转一定角度后，再对此直线上的一个点进行反伸，可使相等部分重复。

旋转反伸轴以 L_i^n 表示，轴次 n 为 1、2、3、4、6。相应的基转角为 360°、180°、120°、90°、60°。

现以 L_i^4（图示符号用◇或⬘）为例来说明。图 1.3.11(a)绘出的多面体 $ABCD$ 称四方四面体，它由 ABC、BDC、ABD 和 ACD 四个等腰三角形面所组成。

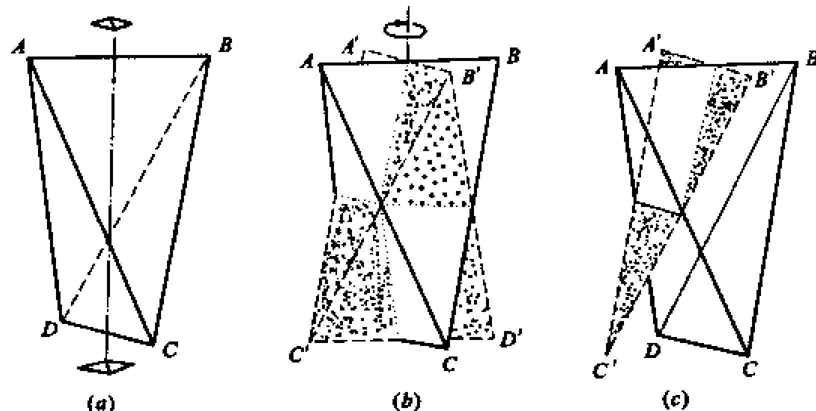


图 1.3.11 具 L_i^4 的四方四面体

可以明显地看出，图 1.3.11(a)中的 A、B、C、D 围绕 L_i^4 旋转 90°到达 A'、B'、C'、D'的位置（图 1.3.11(b)），此时 $A'B'C'$与 BCD 这两个相等的晶面处于平行反向位置（图 1.3.11(c)），经过中心点的反伸 $A'B'C'$和 BCD 重合。同理，$B'C'D'$ 与 ABC、$A'B'D'$ 与 ACD、$D'C'B'$ 与 ABC 重合，即四方四面体经 L_i^4 的旋转反伸作用后，整个图形复原。

旋转反伸轴 L_i^1、L_i^2、L_i^3、L_i^4、L_i^6 的作用如图 1.3.12 所示。

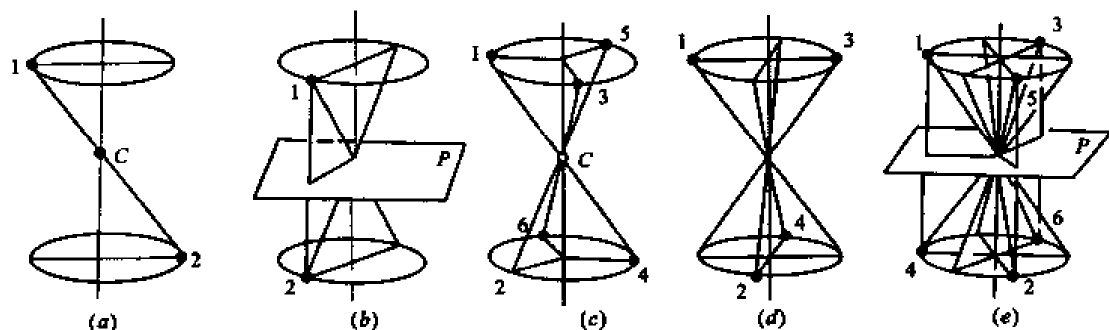


图 1.3.12 旋转反伸轴的图解

值得指出的是，除 L_i^4 外，其余各种旋转反伸轴都可以用其他简单的对称要素或它们的组合来代替，其间关系如下（参看图 1.3.12）：

$$L_i^1 = C;\quad L_i^2 = P;\quad L_i^3 = L^3 + C;\quad L_i^6 = L^2 + P_{\perp}$$

现分别加以说明。

L_i^1 的相应的对称操作为旋转 360°后反伸，因为图形旋转 360°后复原，也就是说等于不旋转而单纯反伸。如图 1.3.12(a)，点 1 反伸与点 2 重合，所以 $L_i^1=C$。

L_i^2 的相应的对称操作为旋转 180°后反伸。如图 1.3.12(b)，点 1 围绕 L_i^2 旋转 180°后，再凭借 L_i^2 上的一点反伸与点 2 重合。但由图中可以看出，凭借垂直 L_i^2 的对称面(P)的反映，也同样可以使点 1 与点 2 重合。因此，$L_i^2=P$。

L_i^3 的相应的对称操作为旋转 120°后反伸。如图 1.3.12(c)，点 1 绕 L_i^3 旋转 120°再凭借 L_i^3 轴上的一点反伸获得点 2，并依此类推，依次获得 1、2、3、4、5、6 共六个点。现在我们将 L_i^3 代之以 L^3+C，即点 1 通过对称轴 L^3 的作用可获得点 1、3、5，再通过对称中心 C 的作用获得点 2、4、6，总共获得的六个点，与由 L_i^3 所导出者完全相同。因此，$L_i^3=L^3+C$。

L_i^4 的相应对称操作为旋转 90°后反伸。如图 1.3.12(d)，点 1 绕 L_i^4 旋转 90°后对 L_i^4 上一点反伸获得点 2，并依此类推，依次获得 1、2、3、4 四个点。L_i^4 不能用任何其他简单的对称要素或它们的组合来代替。

L_i^6 的相应的对称操作为旋转 60°后反伸。如图 1.3.12(e)，从点 1 开始，绕 L_i^6 旋转 60°后再凭借 L_i^6 上一点反伸获得点 2；依此类推，经 L_i^6 的作用，依次可获得 1、2、3、4、5、6 六个点。若将 L_i^6 代之以 $L^3+P_{\perp}$，由点 1 开始，经 L^3 的作用可获得点 1、3、5，再经过垂直于 L^3 的对称面 P 的作用又可获得点 2、4、6，总计六个点与 L_i^6 所导出者完全相同。因此，$L_i^6=L^3+P_{\perp}$。

在晶体分类中一般应用的旋转反伸轴为 L_i^4 和 L_i^6，在作图中分别以◇和⬡表示。

3.4 对称要素的组合

在结晶多面体中，可以有一个要素单独存在，也可以有若干对称要素组合在一起共存。

对称要素的组合服从以下规律。

①如果有一个二次轴 L^2 垂直 n 次轴 L^n，则必有 n 个 L^2 垂直 L^n，即 $L^n\times L_{\perp}^2\rightarrow L^nnL_{\perp}^2$。如 $L^2\times L_{\perp}^2\rightarrow L^22L^2$ ($3L^2$)，$L^3\times L_{\perp}^2\rightarrow L^33L^2$，$L^4\times L_{\perp}^2\rightarrow L^44L^2$，$L^6\times L_{\perp}^2\rightarrow L^66L^2$。图 1.3.13 为具有 L^33L^2 的 α—石英晶体图。

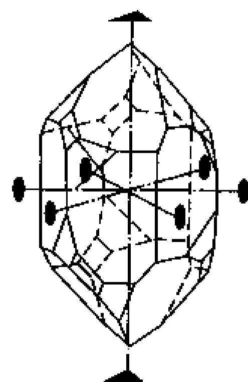


图 1.3.13　具有 L^33L^2 的图形

(α—石英晶体)

②如果有一个对称面 P 垂直偶次对称轴 $L^{n(偶)}$，则在其交点存在对称中心 C，即 $L^{n(偶)}\times P_{\perp}\rightarrow L^nPC$。如 $L^2\times P_{\perp}\rightarrow L^2PC$，$L^4\times P_{\perp}\rightarrow L^4PC$，$L^6\times P_{\perp}\rightarrow L^6PC$。图 1.3.14 为具有 L^2PC 的石膏晶体图。

③如果有一个对称面 P 包含对称轴 L^n，则必有 n 个 P 包含 L^n，即 $L^n\times P_{/\!/}\rightarrow L^nnP$。如 $L^2\times P_{/\!/}\rightarrow L^22P$，$L^3\times P_{/\!/}\rightarrow L^33P$，$L^4\times P_{/\!/}\rightarrow L^44P$，$L^6\times P_{/\!/}\rightarrow L^66P$。图 1.3.15 为具有 L^66P 的红锌矿晶体图(这一规

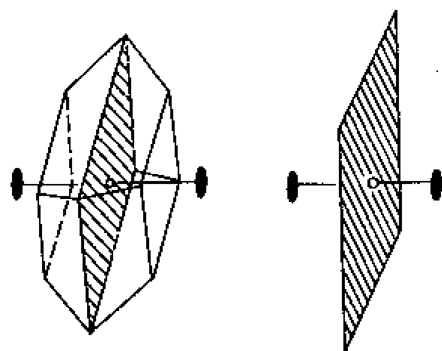


图 1.3.14　具有 L^2PC 的图形

(石膏晶体)

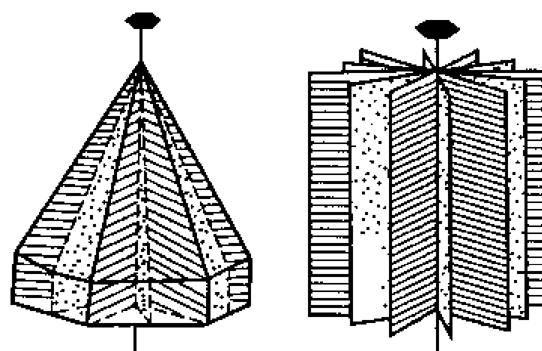
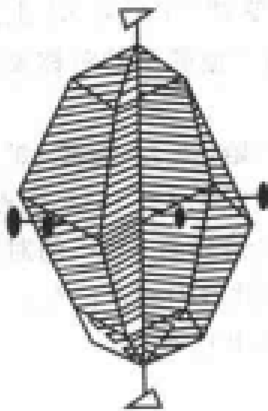


图 1.3.15　具有 L^66P 的图形

(红锌矿晶体)

律也可以这样理解，即对称面的交线必为对称轴，其基转角为相邻二对称面夹角的 2 倍）。

④如果有一个二次轴垂直于旋转反伸轴 L_i^n，或者有一个对称面 P 包含 L_i^n，当 n 为奇数时必有 nL^2 垂直 L_i^n 和 n 个对称面包含 L_i^n，如图 1.3.16，$L_i^3 \times L_\perp^2 \to L_i^3 3L_\perp^2 3P_{/\!/}$；当 n 为偶数时必有 $n/2$ 个 L^2 垂直 L_i^n 和 $n/2$ 个 P 包含 L_i^n，如图 1.3.17，$L_i^4 \times L_\perp^2 \to L_i^4 2L_\perp^2 2P_{/\!/}$。



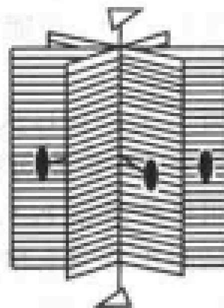


图 1.3.16　具有 $L_i^3 3L^2 3P$ 的图形

（方解石晶体）

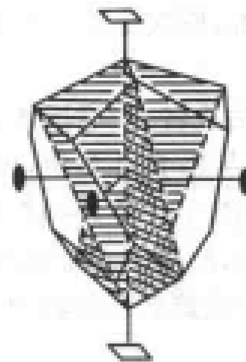


图 1.3.17　具有 $L_i^4 2L^2 2P$ 的图形

（黄铜矿晶体）

3.5　对称型及其推导

结晶多面体中，全部对称要素的组合，称为该结晶多面体的对称型。

由于在结晶多面体中，全部对称要素相交于一点（晶体中心），在进行对称操作时至少有一点不移动，因此对称型也称为点群。

根据结晶多面体中可能存在的对称要素及其组合规律，推导出晶体中可能出现的对称型共有 32 种。

现将晶体中一切可能的对称型的推导方法简述如下。

首先回顾一下结晶多面体中可能存在的对称要素，它们是：

对称轴 L^1、L^2、L^3、L^4、L^6；

对称面 $P(L_i^2=P)$；

对称中心 $C(L_i^1=C)$；

旋转反伸轴 $L_i^1=C, L_i^2=P, L_i^3=L^3+C, L_i^4, L_i^6=L^3+P$。

为了便于推导，我们把这些对称要素的组合分为两类：把高次轴不多于一个的组合称为 A 类；把高次轴多于一个的组合称为 B 类。

1. A 类对称型的推导

上列对称要素可能的组合共有以下七种情况：

①对称轴 L^n 单独存在。可能的对称型为 L^1；L^2；L^3；L^4；L^6。

②对称轴与对称轴的组合。由于 A 类只包括高次轴不多于一个的对称型，所以只考虑 L^n 与 L^2 的组合。如果 L^2 与 L^n 斜交仍有可能出现多于一个的高次轴，如图 1.3.18(a)L^2 与 L^n 斜交，则 L^n 围绕 L^2 旋转 180°，必将产生另一个 L^n；而如图 1.3.18(b)当 L^2 垂直 L^n 时则不会产生新的 L^n。因此在这里我们只考虑 L^n 与垂直它的 L^2 的组合。根据上节所述对称要素组

合规律 $L^n \times L^2 \rightarrow L^n nL^2$，可能的对称型为：$(L^1L^2=L^2)$；$L^22L^2=3L^2$；$L^33L^2$；$L^44L^2$；$L^66L^2$（括号内的对称型与其他项推导出的对称型重复，下同）。

③对称轴 L^n 与垂直它的对称面 P 的组合。考虑到组合规律 $L^{n(偶次)} \times P_{\perp} \rightarrow L^{n(偶次)}PC$，则可能的对称型为：$(L^1P=P)$；$L^2PC$；$(L^3P=L_i^6)$；$L^4PC$；$L^6PC$。

④对称轴 L^n 与包含它的对称面的组合。根据组合规律 $L^n \times P_{/\!/} \rightarrow L^n nP$，可能的对称型为：$(L^1P=P)$；$L^22P$；$L^33P$；$L^44P$；$L^66P$。

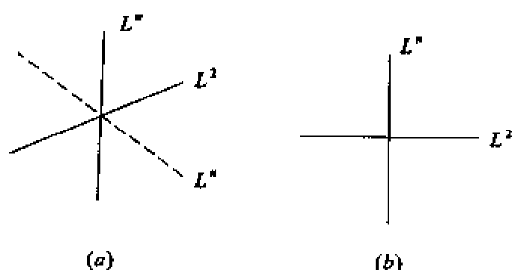


图 1.3.18 L^n 与 L^2 的组合
(a) L^n 与 L^2 斜交产生新的 L^n；
(b) L^n 与 L^2 垂直不产生新的 L^n

对称面 P 若与高次轴 L^n 斜交，仍有可能产生多于一个的高次轴。如图 1.3.19(d)，L^n 与 P 斜交，通过 P 的反映必将产生另一个 L^n；而 P 垂直或包含 L^n 时则不会产生新的 L^n，如图 1.3.19(a)、(b)所示，故此处 L^n 与 P 的组合只考虑上述的 P 垂直或包含 L^n 两种情况。

⑤对称轴 L^n 与垂直它的对称面以及平行它的对称面的组合。垂直 L^n 的 P 与包含 L^n 的 P 的交线必为垂直 L^n 的 L^2（图 1.3.19(c)），即 $L^n \times P_{\perp} \times P_{/\!/} = L^n \times P_{\perp} \times P_{/\!/} \times L_{\perp}^2 = L^n nL^2(n+1)P(C)$（$C$ 只在有偶次轴垂直 P 的情况下产生），可能的对称型为：$(L^1L^22P=L^22P)$；$L^22L^23PC=3L^23PC$；$(L^33L^24P=L_i^63L^23P)$；L^44L^25PC；L^66L^27PC。

⑥旋转反伸轴 L_i^n 单独存在。可能的对称型为：$L_i^1=C$；$L_i^2=P$；$L_i^3=L^3C$；L_i^4；$L_i^6=L^3P$。

⑦旋转反伸轴 L_i^n 与垂直它的 L^2（或包含它的 P）的组合。根据组合规律，当 n 为奇数时 $L_i^n nL^2nP$，可能的对称型为：$(L_i^1L^2P=L^2PC)$；$L_i^33L^23P=L^33L^23PC$；当 n 为偶数时 $L_i^n(n/2)L^2(n/2)P$，可能的对称型为：$(L_i^2L^2P=L^22P)$；$L_i^42L^22P$；$L_i^63L^23P=L^33L^24P$。

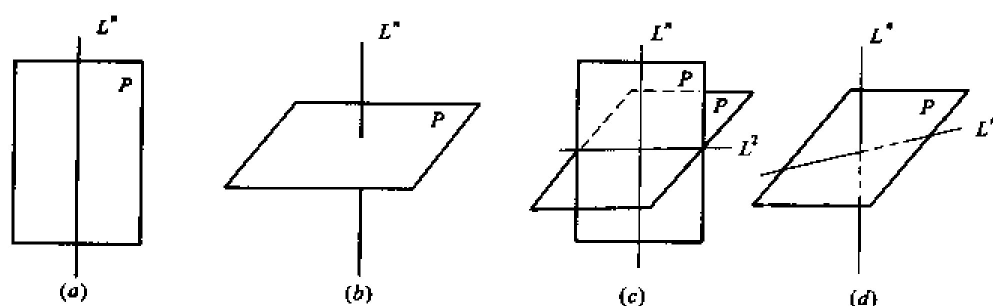


图 1.3.19 L^n 与 P 的组合
(a) $P_{/\!/}$（包含）L^n 不产生新的 L^n；(b) $P_{\perp}L^n$ 不产生新的 L^n；
(c) L^n 与 $P_{\perp}$ 及 $P_{/\!/}$ 的组合在 $P_{/\!/}$ 与 $P_{\perp}$ 交线产生 $L_{\perp}^2$；(d) L^n 与 P 斜交产生新的 L^n

由于对称面 $P=L_i^2$，对称中心 $C=L_i^1$，故都不再单独列出。

综合以上，共推导出 A 类对称型 27 种（见表 1.3.3）。

2. B 类对称型的推导

首先让我们考虑高次轴 L^4 与 L^3 的组合。如图 1.3.20 所示，设有一个 L^4 与 L^3 相交于晶体中心，由于 L^4 的作用，在 L^4 的周围可获得四个 L^3。在每个 L^3 上距晶体中心等距离的地方取一个点，连接这些点可以得到一个正四边形（即图 1.3.20 中的立方体的正方形的面），L^4 出露于正四边形的中心，L^3 出露于正四边形的角顶。由于 L^3 的作用，在 L^3 的周围必定可以获

得 3 个正四边形，它们会集而成一个凸三面角，L^3 即出露于这个凸三面角的角顶上。这样，我们就获得了一个由 6 个正四边形和 8 个凸三面角组成的正多面体——立方体。高次轴 L^4 与 L^3 的组合就相当于正四边形所组成的正多面体——立方体中高次轴的组合。

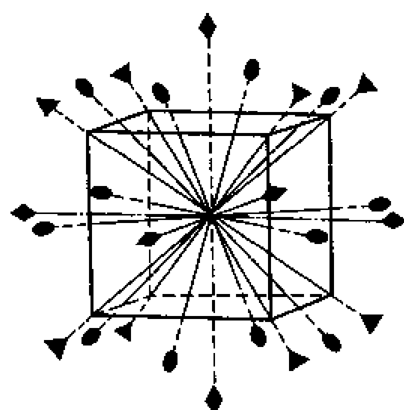


图 1.3.20 L^4 与 L^3 的组合中高次轴的组合

由此可知，在 B 类对称型中，高次轴 L^n 与 L^m 的组合，相当于由正多边形所组成的正多面体中的高次轴的组合。

在立体几何学中业已证明，一个凸多面角至少须由三个面组成，且其面角之和须小于 360°，因此围成正多面体的正多边形只可能是正三角形（内角 60°）、正方形（内角 90°）和正五边形（内角 108°）。它们可能围成的正多面体及其对称轴的组合如表 1.3.2 所列。

表 1.3.2　正多边形可能围成的正多面体及其对称轴的组合

正多边形形状		正三角形			正四边形	正五边形
正多面体形状		四面体	八面体	正三角十二面体	立方体	正五角十二面体
正多面体面棱角数	面	4	8	20	6	12
	棱	6	12	30	12	30
	角	4	6	12	8	20
对称轴		$3L^2 4L^3$	$3L^4 4L^3 6L^2$	$6L^5 10L^3 15L^2$	$3L^4 4L^3 6L^2$	$6L^5 10L^3 15L^2$

从表 1.3.2 可以看出，正三角十二面体和正五角十二面体皆具有 L^5，与晶体的对称不符，可不予考虑。其余三种多面体中对称轴的组合有下面两种类型：

①立方体及八面体 $3L^4 4L^3 6L^2$；

②四面体 $3L^2 4L^3$；

在第一种对称型 $3L^4 4L^3 6L^2$ 中加入一个不产生新对称轴的对称面，可以获得如下的第三种对称型：

③$3L^4 4L^3 6L^2 9PC$；

在上述第二种对称型 $3L^2 4L^3$ 中加入不产生新对称轴的对称面的方法有二，其结果可分别获得如下的第四种和第五种对称型：

表 1.3.3　32 种对称型的推导

共同式		对称型 L^n	$L^n nL^2$	$L^n P_{\perp}(C)$	$L^n nP_{/\!/}$	$L^n nL^2(n+1)P(C)$	L_i^n	$L_i^{n(奇)} nL^2 nP$ $L_i^{n(偶)}(n/2)L^2(n/2)P$	晶系
A类	$n=1$	L^1					$L_i^1=C$		三斜晶系
	$n=2$	L^2		L^2PC			$L_i^2=P$		单斜晶系
			$3L^2$		$L^2 2P$	$3L^2 3PC$			斜方晶系
	$n=3$	L^3	$L^3 3L^2$		$L^3 3P$		$L_i^3=L^3C$	$L_i^3 3L^2 3P=L^3 3L^2 3PC$	三方晶系
	$n=4$	L^4	$L^4 4L^2$	L^4PC	$L^4 4P$	$L^4 4L^2 5PC$	L_i^4	$L_i^4 2L^2 2P$	四方晶系
	$n=6$	L^6	$L^6 6L^2$	L^6PC	$L^6 6P$	$L^6 6L^2 7PC$	$L_i^6=L^3P$	$L_i^6 3L^2 3P=L^3 3L^2 4P$	六方晶系
B类		$3L^2 4L^3$	$3L^4 4L^3 6L^2$	$3L^2 4L^3 3PC$	$3L_i^4 4L^3 6P$	$3L^4 4L^3 6L^2 9PC$			等轴晶系

④$3L^2 4L^3 3PC$；

⑤$3L_i^4 4L^3 6P$。

属于 B 类的对称型共有上列的 5 种。

综合 A、B 两类，晶体中可能有的对称型共 32 种，如表 1.3.3 所示。

3.6　晶体的分类

根据晶体对称的特点，可以对晶体进行合理的科学分类。分类依据及分类体系见表 1.3.4。

首先，把属于同一对称型的晶体归为一类，称为晶类。晶体中存在 32 种对称型，亦即有 32 种晶类(表 1.3.4 中所列晶类名称的来源将在第 4 章阐述)。

根据是否有高次轴以及有一个或多个高次轴，把 32 个对称型归纳为低、中、高级三个晶族。

在各晶族中，再根据对称特点划分晶系，晶系共有七个。它们是属于低级晶族的三斜晶系(无对称轴和对称面)、单斜晶系(二次轴和对称面各不多于一个)和斜方晶系(二次轴或对称面多于一个)；属于中级晶族的四方晶系(有一个四次轴)、三方晶系(有一个三次轴)和六方晶系(有一个六次轴)；属于高级晶族的等轴晶系(有四个三次轴)。

在结晶学及矿物学的研究中，熟练地掌握 3 个晶族、7 个晶系、32 个对称型这一晶体分类体系及其划分依据是十分必要的。

为了便于推导和记忆 32 个对称型，掌握晶体分类体系，必须熟知各晶族、晶系的对称特点(表 1.3.4 的一、二、三栏)和对称要素及其组合的基本类型(表 1.3.3 的七种共同式和等轴晶系对称型体系)。如低级晶族无高次轴，其中三斜晶系无 L^2 和 P，则只能有 L^1 和 $L_i^1=C$ 两个对称型；单斜晶系 L^2 及 P 均不多于一个，则只能有 L^2、P 和 L^2PC 三个对称型；斜方晶系 L^2 或 P 多于一个，则必只有 L^2 间的组合 $L^2\times L^2\rightarrow L^2 2L^2(3L^2)$、$L^2$ 与 P 的组合 $L^2\times P_{/\!/}\rightarrow L^2 2P$ 以及 L^2、L^2、P 间的组合 $L^2\times L^2\times P\rightarrow 3L^2 3PC$ 三个对称型。中级晶族只有一个高次轴，则以三次轴(L^3、L_i^3)、四次轴(L^4、L_i^4)、六次轴(L^6、L_i^6)为基础，按对称要素组合的七种基本类型(表 1.3.3)的七种共同式，极易导出三方、四方、六方每个晶系的七种对称型(具三次轴的两个对称型 $L^3P=L_i^6$、$L^3 3L^2 4P=L_i^6 3L^2 3P$ 应属六方晶系，故三方晶系只有五种对称型)。高级晶族有数个高次轴，其所属的等轴晶系的 5 个对称型中由八面体导出者有 $3L^4 4L^3 6L^2$ 和 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$(前者加入 9 个对称面)，由四面体导出者有 $3L^2 4L^3$、$3L^2 4L^3 3PC$、$3L_i^4 4L^3 6P$

（后两者系前者分别加入了 3 个或 6 个对称面构成的）。

表 1.3.4　晶体的分类

晶族	晶系	对称特点	对称型种类	对称型符号		晶类名称
				圣费利斯符号	国际符号	
低级晶族（无高次轴）	三斜晶系	无 L^2，无 P	1. L^1	C_1	1	单面晶类
			2. C①	$C_i=S_2$	$\bar{1}$	平行双面晶类
	单斜晶系	L^2 或 P 不多于 1 个	3. L^2	C_2	2	轴双面晶类
			4. P	$C_{1h}=C_s$	m	反映双面晶类
			5. L^2PC	C_{2h}	$2/m$	斜方柱晶类
	斜方晶系	L^2 或 P 多于 1 个	6. $3L^2$	$D_2=V$	222	斜方四面体晶类
			7. L^22P	C_{2v}	$mm(mm2)$	斜方单锥晶类
			8. $3L^23PC$	$D_{2h}=V_h$	$mmm\left(\frac{2}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m}\right)$	斜方双锥晶类
中级晶族（只有一个高次轴）	四方晶系	有一个 L^4 或 L_i^4	9. L^4	C_4	4	四方单锥晶类
			10. L^44L^2	D_4	42(422)	四方偏方面体晶类
			11. L^4PC	C_{4h}	$4/m$	四方双锥晶类
			12. L^44P	C_{4v}	$4mm$	复四方单锥晶类
			13. L^44L^25PC	D_{4h}	$4/mmm\left(\frac{4}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m}\right)$	复四方双锥晶类
			14. L_i^4	S_4	$\bar{4}$	四方四面体晶类
			15. $L_i^42L^22P$	$D_{2d}=V_d$	$\bar{4}2m$	复四方偏三角面体晶类
	三方晶系	有一个 L^3	16. L^3	C_3	3	三方单锥晶类
			17. L^33L^2	D_3	32	三方偏方面体晶类
			18. L^33P	C_{3v}	$3m$	复三方单锥晶类
			19. L^3C	$C_{3i}=S_6$	$\bar{3}$	菱面体晶类
			20. L^33L^23PC	D_{3d}	$\bar{3}m\left(\bar{3}\frac{2}{3}\right)$	复三方偏三角面体晶类
	六方晶系	有一个 L^6 或 L_i^6	21. L_i^6	C_{3h}	$\bar{6}$	三方双锥晶类
			22. $L_i^63L^23P$	D_{3h}	$\bar{6}2m$	复三方双锥晶类
			23. L^6	C_6	6	六方单锥晶类
			24. L^66L^2	D_6	62(622)	六方偏方面体晶类
			25. L^6PC	C_{6h}	$6/m$	六方双锥晶类
			26. L^66P	C_{6v}	$6mm$	复六方单锥晶类
			27. L^66L^27PC	D_{6h}	$6/mmm\left(\frac{6}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m}\right)$	复六方双锥晶类
高级晶族（有数个高次轴）	等轴晶系	有四个 L^3	28. $3L^24L^3$	T	23	五角三四面体晶类
			29. $3L^24L^33PC$	T_h	$m3\left(\frac{2}{m}\bar{3}\right)$	偏方复十二面体晶类
			30. $3L_i^44L^36P$	T_d	$\bar{4}3m$	六四面体晶类
			31. $3L^44L^36L^2$	O	43(432)	五角三八面体晶类
			32. $3L^44L^36L^29PC$	O_h	$m3m\left(\frac{4}{m}\bar{3}\frac{2}{m}\right)$	六八面体晶类

①下边划有横线者为较常见的重要对称型。

4　晶体的理想形状——单形和聚形

上一章我们讨论了晶体的对称和晶体的分类，但是这些只涉及到晶体上晶面、晶棱、晶顶作有规律性重复的问题，尚未考虑晶体的具体形状特征。因为，对称型相同的晶体可以具有完全不同的形态。例如，如图 1.4.1，属于 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$ 对称型的晶体，外形就有图(*a*)、(*b*)、(*c*)等三种不同的形态。

可见，仅根据晶体对称型还不足以说明一个晶体的形状，同时，晶体的形态不但取决于其化学成分和内部构造，并且还受到生长环境因素的影响，不同的生长环境形成的晶体虽然其物理和化学性质仍保持相同性，但其形态往往是有所差异的，这样，我们对晶体形态的讨论就显得较为重要了。

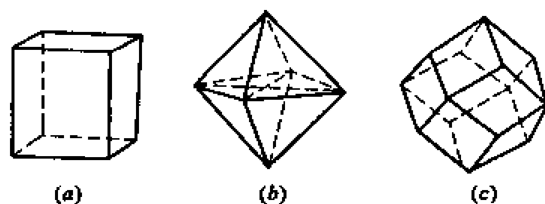


图 1.4.1　同一种对称型的不同形态的晶体
(*a*)立方体；(*b*)八面体；(*c*)菱形十二面体

研究晶体形态的意义主要是：

①晶体形态往往是一些矿物的特征，不同晶体具有不同晶形，因此，研究晶体形态有助于鉴定矿物；

②晶体的形态受着生长环境的影响，从而又可以根据晶形来推测晶体形成时的环境，因此，对晶体形态的研究有助于阐明矿物晶体的形成条件，有利于对矿物成因的研究。

基于晶体外形是内部构造对称性的表现，尽管有对称型相同而外形可以完全不同的晶体存在，但对称规律(对称型)仍为研究晶体理想形态的基础。

晶体的理想形状是指由面网性质相同，同等发育，同形等大的晶面组成的几何多面体。

晶体的理想形状根据组成晶体的晶面形状、大小是否相同及其对称规律可以分为单形和聚形两种类型。

4.1　单　　形

4.1.1　单形的概念

单形是整个晶体各晶面形状相同，大小相等，各晶面可用晶体上存在着的对称要素的操作而有规律地重复出现。换句话说：单形是以对称要素联系着的一组晶面的总称，依空间格子规律，格子中的相同面网所形成的总和即为单形。

如图 1.4.2 所示的单形为四方双锥，它是由 8 个同形等大的等腰三角形晶面组成，每个晶面皆可由其对称要素——L^4PC 与已知(原始)晶面(*A*)操作而推导出来。

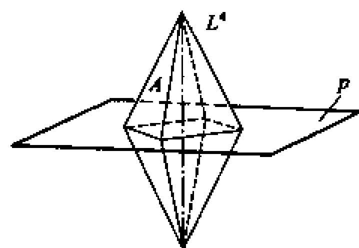


图 1.4.2　单型-四方双锥及其对称要素图解

显然，单形上的各个晶面不但在外形上同形等大，而且在

物理性质和化学性质上也是相同的，因为属于同一单形的各个晶面的面网构造是相同的（对真实晶体来说，由于生长环境不理想，外形上的同形等大往往表现不出来，但物理和化学性质的相同性都是不变的），同时各个晶面必能相互对称重复（不属于同一单形的各晶面之间则不能），以及同一单形的各个晶面，它们对于相同对称要素的关系如平行、垂直或以某一角度相交等应该都是一致的。

4.1.2 单形的推导

从前面所述单形的概念中不难理解：如果以单形中任意一个晶面作为原始晶面，则可通过对称型中全部对称要素的作用，必能导出该单形的全部晶面，在同一对称型中，由于原始晶面与对称要素的相对位置不同，必能导出不同的单形，不同的对称型所导出的单形，就其对称性来说，必定是不同的。

但是，一个对称型中，原始晶面与对称要素的相对位置关系，最多只可能有七种不同意义的位置，因此，同一对称型中，最多只可能推导出七种单形。对于那些包含对称要素较少的对称型来说，晶面与对称要素可能的相对位置数也会相应地减少。

现举例说明如下：

例1 对称型 L^4PC 单形的推导：对称要素在空间的分布如图 1.4.3 所示，原始晶面与对称要素的相对位置可能有如下七种：

位置 1[图 1.4.3(*a*)]：原始晶面和 L^4 平行，而与对称面(p)垂直，并且与 x、y 轴相截不等距离，则由 L^4 作用，原始晶面绕 L^4 旋转一周后，产生 4 个同形等大晶面间互相垂直的晶面。用 p 和对称中心 c 的作用不能再引出新的晶面，这 4 个晶面构成"四方柱"（单形符号为{hko}）的单形。

位置 2：原始晶面与 L^4 和 p 的相对位置与位置 1 相同，但是，原始晶面与 x、y 轴相截是等距离的，推导出的单形仍为"四方柱"（单形符号为{110}）。

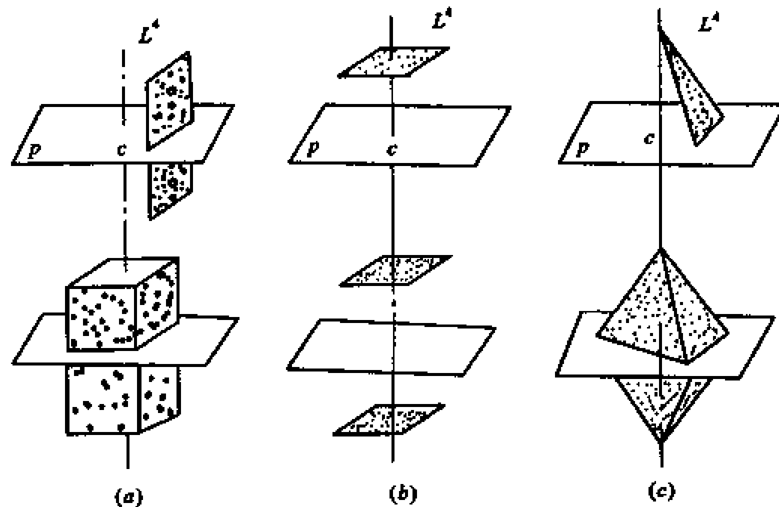


图 1.4.3 对称型 L^4PC 推导单形的图解

位置 3：情况亦同位置 1，不同原始晶面只与 x 轴相截，而与 y、z 轴平行，推导出的单形亦为"四方柱"（单形符号为{100}）。

位置4[图1.4.3(*b*)]：原始晶面与 p 平行，而与 L^4 垂直，通过 p 的反映作用或者对称中心的反伸作用，可以导出一个与原始晶面平行，且相等的晶面，用 L^4 在这里不能再导出其他的晶面，这两个晶面构成"平行双面"(亦称板面)的单形。

位置5[图1.4.3(*c*)]：原始晶面与 L^4 斜交，与 p 亦斜交，并且与 x、y、z 轴相截不等距离，由于 L^4 的作用，推导出与 L^4 等角度相交的相同的4个三角形晶面，组成一个四方单锥，再通过 p 的反映，或对称中心 c 的反伸，又可导出另一个四方单锥，它们以锥底相连，构成一个"四方双锥"单形(单形符号 $\{hhl\}$)。

位置6：情况同位置5，不过其原始晶面与 x、y 轴相截等距离，而与 z 轴相截不等，此推导出的单形仍为"四方双锥"(单形符号为 $\{hhl\}$)。

位置7：情况亦同位置5，但是原始晶面与 x 轴或 y 轴平行、与 z 轴相截不等距离，推导出的单形亦为"四方双锥"(单形符号为 $\{hol\}$ 或 $\{okl\}$)。

综上所述，对称型 L^4PC 对称要素与原始晶面的相对七种位置中，共推导出的单形有四方柱、平行双面和四方双锥等三种。

例2 对称型 L^22P 单形的推导：对称型 L^22P 其对称要素在空间的分布如图1.4.4所示，原始晶面与对称要素的相对位置可能有如下七种：

位置1[图1.4.4(*a*)]：原始晶面同时垂直于 L^2 和 $2P$，通过 L^2 和 $2P$ 的作用不能产生新的晶面，这一晶面就构成一个单形——单面。

位置2[图1.4.4(*b*)]：原始晶面与 L^2，并与 $2P$ 中的一个 p_1 平行，而与另一个 p_2 垂直，那么由 L^2 的作用或 p_1 的作用，可产生另一平行它的新面，这一对晶面构成了一个单形——平行双面。

位置3：相当于原始晶面由位置2开始绕 L^2 旋转90°，此时，原始晶面平行 L^2 和 p_2 而垂直 p_1，推导的结果与位置2相同，其单形亦为平行双面。

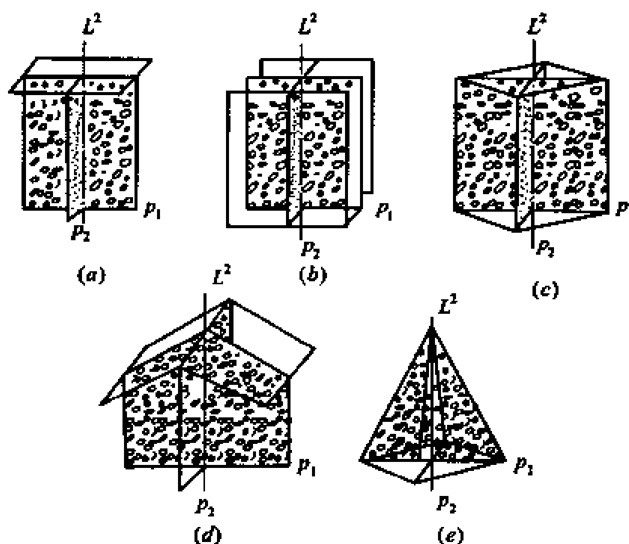


图1.4.4 对称型 L^22P 推导单形的图解

位置4[图1.4.4(*c*)]：原始晶面与 L^2 平行，而与 $2p$ 斜交，通过 L^2 和一个 p 的作用或 $2p$ 的作用，可获得平行 L^2 的4个晶面，它们组成一单形——斜方柱。

位置5[图1.4.4(*d*)]：原始晶面与 L^2 斜交，与 p_2 斜交，而与 p_1 垂直，由于 L^2 或 p_2 的作用可以产生一个与原始晶面相交的晶面，这两个晶面组成一个单形——双面。

位置 6：即原始晶面由位置 5 开始绕 L^2 旋转 90°，此时，原始晶面与 L^2 和 p_1 斜交，而与 p_2 垂直，推导结果其单形亦为双面。

位置 7[图 1.4.4(e)]：原始晶面与 L^2 和 $2p$ 均斜交，通过 L^2 和一个 p 的作用或 $2p$ 的作用，均可获得相交于一个顶点的 4 个晶面，它们组成一个单形——斜方单锥。

总结起来，对称型 $L^2 2P$ 对称要素与原始晶面的相对七种位置中，共推导出的单形有：单面、平行双面、斜方柱、双面、斜方单锥五种。

由于每个对称型中，其对称要素与原始晶面可以有七种有意义的不同位置，原始晶面每一个位置均可推导出一种单形，即一个对称型可以推导出七种单形，那么，32 种对称型似乎将有 224 种单形，但是，其中有部分是重复的，这是因为：一方面在对称要素少的对称型中，其位置不同的晶面就有可能与对称要素间相对位置关系是相同的，从而所推导出的单形也将是相同的。如在对称型 $L^4 PC$ 中，原始晶面均与 L^4 平行，而又与 p 垂直的位置就有三种，因而推导出的单形都是四方柱，又如在对称型 C 中，所有不同位置的原始晶面与对称要素的相对位置完全都相同，所以推导出的单形都是平行双面。另一方面，在相同对称要素较多的情况下，某几个特定的、位置不同的原始晶面其与对称要素间的相对位置关系也可以相同，也可导出相同的单形，如在对称型 $L^2 2P$ 中，原始晶面与 L^2 和一个 p 斜交，而与另一个 p 垂直的位置就有两种，它们推导出的单形均为双面。因此，像这样重复的单形就有 78 种，即 32 种对称型中，推导出的单形不是 224 种，而只有 146 种。

实际上，晶体中一切可能出现的，其外形以及对称性不同的单形共计只有 146 种，如果考虑到具有 47 种左、右形的单形的话，则具有不同对称型的单形之数目将增至 193 种。

4.1.3 47 种几何单形在各晶系中分布

47 种几何单形的形状见表 1.4.2。现将它们按低、中、高级晶族依次描述如下。一般说来，对于一个单形的描述，包括晶面的形状、数目、相互关系，晶面与对称要素的相对位置以及单形横切面的形状等。当晶体定向后，晶面符号(单形符号)是识别单形最重要的依据，有关这方面的情况将在各晶系晶体分述中详加讨论。本节将只对 47 种几何单形作概括的浏览。

1. 低级晶族的单形

低级晶族共有 7 种单形。

①单面，由一个晶面组成。

②平行双面，由一对相互平行的晶面组成。

③双面，由两个相交的晶面组成。若此二晶面由二次轴 L^2 相联系时称轴双面；若由对称面 P 相联系时称反映双面。

④斜方柱，由 4 个两两平行的晶面组成。它们相交的晶棱互相平行而形成柱体，横切面为菱形。

⑤斜方四面体，由 4 个不等边的三角形的晶面所组成。晶面互不平行，每一晶棱的中点都是 L^2 的出露点，通过晶体中心的横切面为菱形。这一单形仅见于斜方晶系 $3L^2$ 对称型中，单形符号为$\{hkl\}$。

⑥斜方单锥，由 4 个不等边三角形的晶面相交于一点而形成的单锥体，锥顶出露 L^2，横切面为菱形，仅见于斜方晶系 $L^2 2P$ 对称型中，单形符号为$\{hkl\}$。

⑦斜方双锥，由 8 个不等边三角形的晶面所组成的双锥体。犹如两个斜方单锥以底面相

联结而成。每 4 个晶面会聚于一点，横切面为菱形。仅见于斜方晶系 $3L^23PC$ 对称型中，单形符号为$\{hkl\}$。

上述低级晶族 7 种单形中，三斜晶系仅见单面(当不具对称中心时)和平行双面(当具对称中心时)；单斜晶系增加了双面和斜方柱；斜方晶系又增加了斜方单锥、斜方双锥和斜方四面体，而这 3 种单形都分别只出现于一个特定的对称型中(见表 1.4.1)。

表 1.4.1 各晶系晶类的单形

表 1.4.1.1 三斜晶系的单形

单形符号 \ 对称型	$1(L^1)$	$\bar{1}(C)$
$\{hkl\}$	1.* 单 面(1)**	2. 平行双面(2)
$\{0kl\}$	单 面(1)	平行双面(2)
$\{h0l\}$	单 面(1)	平行双面(2)
$\{hk0\}$	单 面(1)	平行双面(2)
$\{100\}$	单 面(1)	平行双面(2)
$\{010\}$	单 面(1)	平行双面(2)
$\{001\}$	单 面(1)	平行双面(2)

* 数字为 146 种结晶单形的序号；** 括号内数字为单形晶面的数目，下同。

表 1.4.1.2 单斜晶系的单形

单形符号 \ 对称型	$2(L^2)$	$m(P)$	$2/m(L^2PC)$
$\{hkl\}$	3. 轴 双 面(2)	6. 反映双面(2)	9. 斜 方 柱(4)
$\{0kl\}$	轴 双 面(2)	反映双面(2)	斜 方 柱(4)
$\{h0l\}$	4. 平行双面(2)	7. 单 面(1)	10. 平行双面(2)
$\{hk0\}$	轴 双 面(2)	反映双面(2)	斜 方 柱(4)
$\{100\}$	平行双面(2)	单 面(1)	平行双面(2)
$\{010\}$	5. 单 面(1)	8. 平行双面(2)	11. 平行双面(2)
$\{001\}$	平行双面(2)	单 面(1)	平行双面(2)

表 1.4.1.3 斜方晶系的单形

单形符号 \ 对称型	$222(3L^2)$	$mm(L^2P)$	$mmm(3L^23PC)$
$\{hkl\}$	12. 斜方四面体(4)	15. 斜方单锥(4)	20. 斜方双锥(8)
$\{0kl\}$	13. 斜 方 柱(4)	16. 反映双面(2)	21. 斜 方 柱(4)
$\{h0l\}$	斜 方 柱(4)	反映双面(2)	斜 方 柱(4)
$\{hk0\}$	斜 方 柱(4)	17. 斜 方 柱(4)	斜 方 柱(4)
$\{100\}$	14. 平 行 双 面(2)	18. 平行双面(2)	22. 平行双面(2)
$\{010\}$	平 行 双 面(2)	平行双面(2)	平行双面(2)
$\{001\}$	平 行 双 面(2)	19. 单 面(1)	平行双面(2)

表 1.4.1.4　四方晶系的单形

单形符号 \ 对称型	$4(L^4)$	$42(L^4 4L^2)$	$4/m(L^4 PC)$	$4mm(L^4 4P)$	$4/mmm(L^4 4L^2 5PC)$	$\bar{4}(L_i^4)$	$\bar{4}2m(L_i^4 2L^2 2P)$
$\{hkl\}$	23. 四方单锥(4)	26. 四方偏方面体(8)	31. 四方双锥(8)	34. 复四方单锥(8)	39. 复四方双锥(16)	44. 四方四面体(4)	47. 复四方偏三角面体(8)
$\{hhl\}$	四方单锥(4)	27. 四方双锥(8)	四方双锥(8)	35. 四方单锥(4)	40. 四方双锥(8)	四方四面体(4)	48. 四方四面体(4)
$\{h0l\}$	四方单锥(4)	四方双锥(8)	四方双锥(8)	四方单锥(4)	四方双锥(8)	四方四面体(4)	49. 四方双锥(8)
$\{hk0\}$	24. 四方柱(4)	28. 复四方柱(8)	32. 四 方 柱(4)	36. 复四方柱(8)	41. 复四方柱(8)	45. 四 方 柱(4)	50. 复四方柱(8)
$\{110\}$	四方柱(4)	29. 四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	37. 四 方 柱(4)	42. 四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	51. 四 方 柱(4)
$\{100\}$	四方柱(4)	四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	四 方 柱(4)	52. 四 方 柱(4)
$\{001\}$	25. 单　面(1)	30. 平行双面(2)	33. 平行双面(2)	38. 单　面(1)	43. 平行双面(2)	46. 平行双面(2)	53. 平行双面(2)

表 1.4.1.5　三方晶系的单形

单形符号 \ 对称型	$3(L^3)$	$32(L^3 3L^2)$	$3m(L^3 3P)$	$\bar{3}(L^3 C)$	$\bar{3}m(L^3 3L^2 3PC)$
$\{hk\bar{i}l\}$	54. 三方单锥(3)	57. 三方偏方面体(6)	64. 复三方单锥(6)	71. 菱 面 体(6)	74. 复三方偏三角面体(12)
$\{h0\bar{h}l\}$	三方单锥(3)	58. 菱 面 体(6)	65. 三方单锥(3)	菱 面 体(6)	75. 菱 面 体(6)
$\{hh\overline{2h}l\}$	三方单锥(3)	59. 三方双锥(6)	66. 六方单锥(6)	菱 面 体(6)	76. 六方双锥(12)
$\{hk\bar{i}0\}$	55. 三 方 柱(3)	60. 复三方柱(6)	67. 复三方柱(6)	72. 六 方 柱(6)	77. 复六方柱(12)
$\{10\bar{1}0\}$	三 方 柱(3)	61. 六 方 柱(3)	68. 三 方 柱(3)	六 方 柱(6)	78. 六 方 柱(6)
$\{11\bar{2}0\}$	三 方 柱(3)	62. 三 方 柱(3)	69. 六 方 柱(6)	六 方 柱(6)	79. 六 方 柱(6)
$\{0001\}$	56. 单　面(1)	63. 平行双面(2)	70. 单　面(1)	73. 平行双面(2)	80. 平行双面(2)

表 1.4.1.6　六方晶系的单形

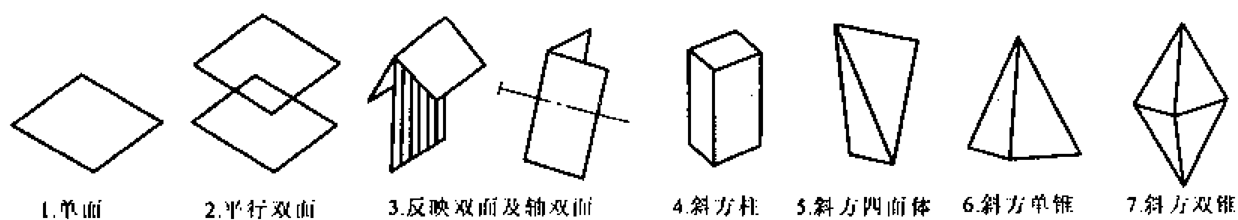
对称型 / 单形符号	$6(L^6)$	$62(L^6L^2)$	$6m(L^6PC)$	$6mm(L^66P)$	$6/mmm(L^66L^27PC)$	$\bar{6}(L_i^6)$	$\bar{6}m2(L_i^63L^23P)$
$\{hk\bar{i}l\}$	81. 六方单锥(6)	84. 六方偏方面体(12)	89. 六方双锥(12)	92. 复六方单锥(12)	97. 复六方双锥(24)	102. 三方双锥(6)	105. 复三方双锥(12)
$\{h0\bar{h}l\}$	六方单锥(6)	85. 六方双锥(12)	六方双锥(12)	93. 六方单锥(6)	98. 六方双锥(12)	三方双锥(6)	106. 三方双锥(6)
$\{hh\overline{2h}l\}$	六方单锥(6)	六方双锥(12)	六方双锥(12)	六方单锥(6)	六方双锥(12)	三方双锥(6)	107. 六方双锥(12)
$\{hk\bar{i}0\}$	82. 六方柱(6)	86. 复六方柱(12)	90. 六方柱(6)	94. 复六方柱(12)	99. 复六方柱(12)	103. 三方柱(6)	108. 复三方柱(6)
$\{10\bar{1}0\}$	六方柱(6)	87. 六方柱(6)	六方柱(6)	95. 六方柱(6)	100. 六方柱(6)	三方柱(6)	109. 三方柱(3)
$\{11\bar{2}0\}$	六方柱(6)	六方柱(6)	六方柱(6)	六方柱(6)	六方柱(6)	三方柱(6)	110. 六方柱(6)
$\{0001\}$	83. 单面(1)	88. 平行双面(2)	91. 平行双面(2)	96. 单面(1)	101. 平行双面(2)	104. 平行双面(2)	111. 平行双面(2)

表 1.4.1.7　等轴晶系的单形

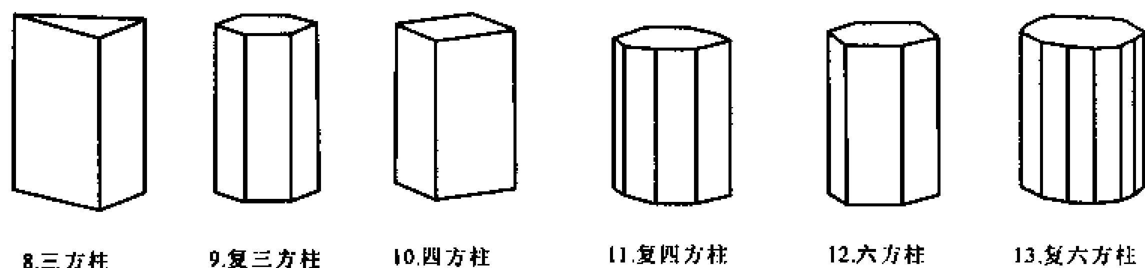
对称型 / 单形符号	$23(3L^24L^3)$	$m3(3L^24L^33PC)$	$\bar{4}3m(3L_i^44L^36P)$	$43(3L^44L^36L^2)$	$m3m(3L^44L^36L^29PC)$
$\{hkl\}$	112. 五角三四面体(12)	119. 偏方复十二面体(24)	126. 六四面体(24)	133. 五角三八面体(24)	140. 六八面体(48)
$\{hhl\}$	113. 四角三四面体(12)	120. 三角三八面体(24)	127. 四角三四面体(12)	134. 三角三八面体(24)	141. 三角三八面体(24)
$\{hkk\}$	114. 三角三四面体(12)	121. 四角三八面体(24)	128. 三角三四面体(12)	135. 四角三八面体(24)	142. 四角三八面体(24)
$\{111\}$	115. 四面体(4)	122. 八面体(8)	129. 四面体(4)	136. 八面体(8)	143. 八面体(8)
$\{hk0\}$	116. 五角十二面体(12)	123. 五角十二面体(12)	130. 四六面体(24)	137. 四六面体(24)	144. 四六面体(24)
$\{110\}$	117. 菱形十二面体(12)	124. 菱形十二面体(12)	131. 菱形十二面体(12)	138. 菱形十二面体(12)	145. 菱形十二面体(12)
$\{100\}$	118. 立方体(6)	125. 立方体(6)	132. 立方体(6)	139. 立方体(6)	146. 立方体(6)

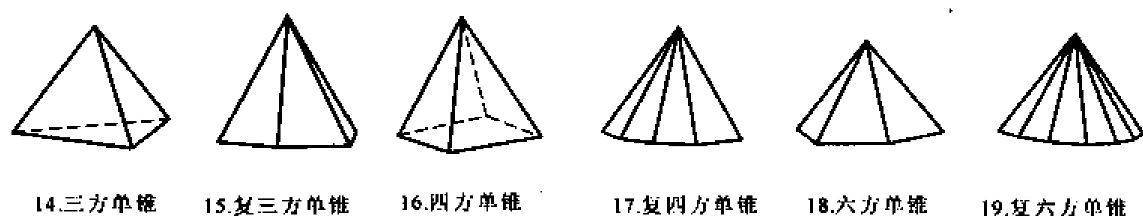
表 1.4.2　47 种单形

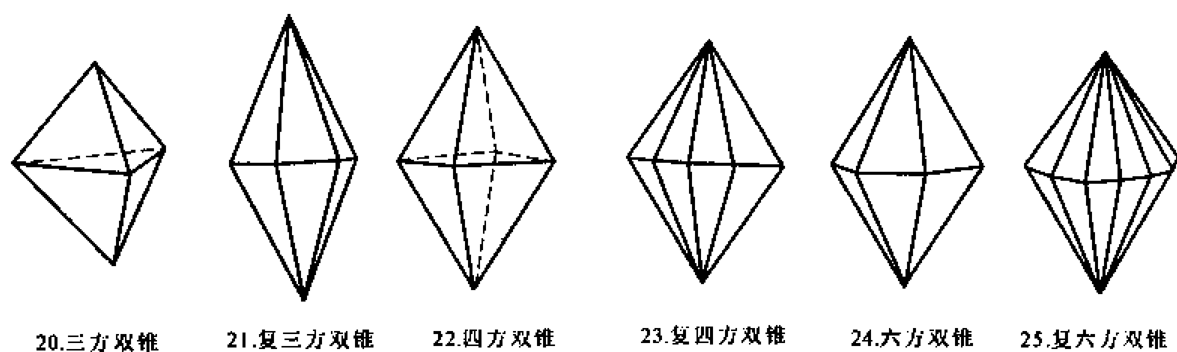
I.低级晶族的单形

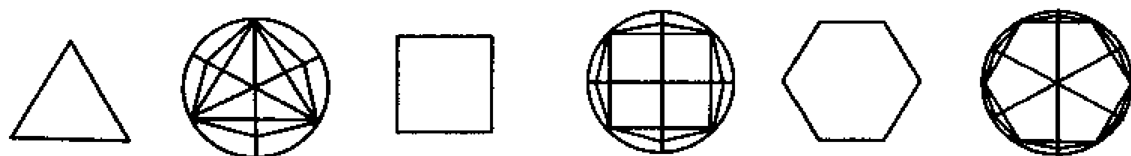


II.中级晶族的单形

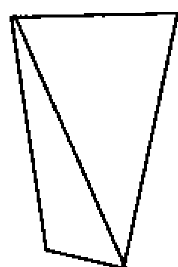




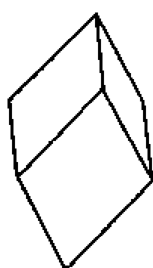




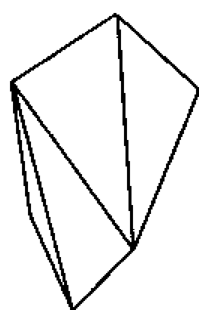
各种柱、锥的横切面



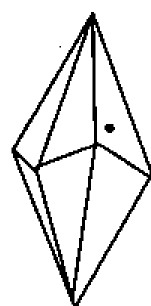
26.四方四面体



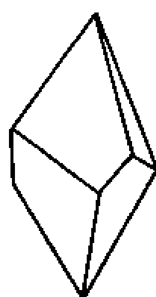
27.菱面体

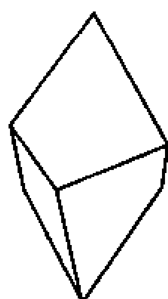


28.复四方偏三角面体



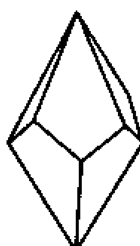
29.复三方偏三角面体

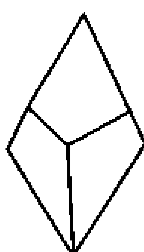




左形　右形

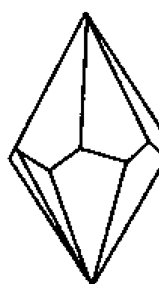
30.三方偏方面体

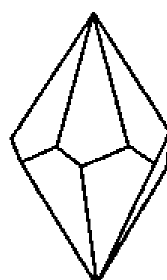




左形　右形

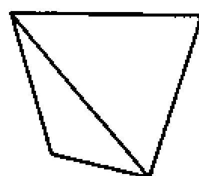
31.四方偏方面体



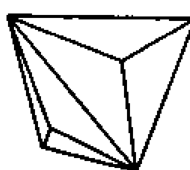


左形　右形

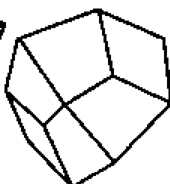
32.六方偏方面体



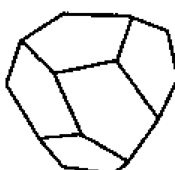
33.四面体

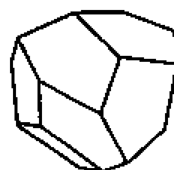


34.三角三四面体



35.四角三四面体

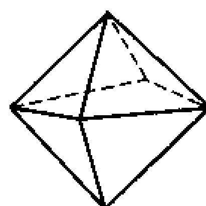




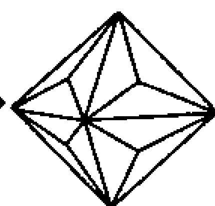
左形　右形

36.五角三四面体

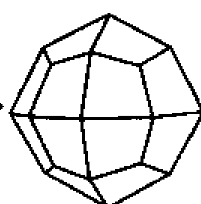
37.六四面体



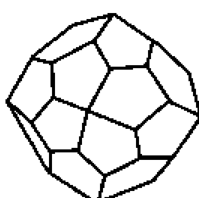
38.八面体

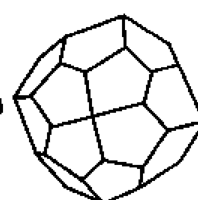


39.三角三八面体



40.四角三八面体

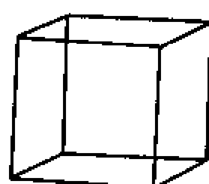




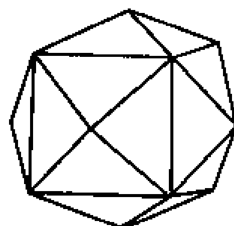
左形　右形

41.五角三八面体

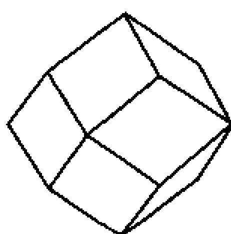
42.六八面体



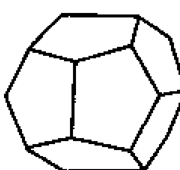
43.立方体



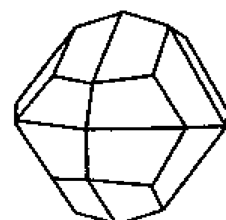
44.四六面体



45.菱形十二面体



46.五角十二面体



47.偏方复十二面体

2. 中级晶族的单形

在中级晶族中，除垂直高次轴（Z 轴）可以出现单形符号为{001}（或{0001}）的单面或平行双面之外，尚可出现下列 25 种单形。现分类简述如下：

①柱类，属于本类的单形系由若干晶面围成柱体。它们的交棱相互平行并平行于高次轴（Z 轴），因此在其单形符号中，Z 轴上的指数为 0。按其横切面的形状可分为如下六种单形：即属于四方晶系的四方柱、复四方柱，属于三、六方晶系的三方柱、复三方柱、六方柱、复六方柱。值得指出的是复三方、复四方和复六方不等于六方、八方和十二方，因为复柱晶面的交角是相间地相等的（参看表 1.4.2 中所绘出的横断面形状）。

②单锥类，属于本类的单形系由若干晶面相交于高次轴上的一点而形成的单锥体。与柱的情况相似，按其横切面的形状，可分为属于四方晶系的四方单锥、复四方单锥，属于三、六方晶系的三方单锥、复三方单锥、六方单锥、复六方单锥等六种单形。

③双锥类，属于本类的单形系由若干晶面分别相交于高次轴上的两点而形成的双锥体。同样的，根据横切面的形状，可以分为属于四方晶系的四方双锥、复四方双锥，属于三、六方晶系的三方双锥、复三方双锥、六方双锥、复六方双锥六种单形。

④四方四面体和复四方偏三角面体，四方四面体由互不平行的 4 个等腰三角形晶面所组成。晶面两两以底边相交，其交棱的中点为 L_i^4 的出露点，围绕 L_i^4 上部二晶面与下部二晶面错开 90°，通过中心的横切面为正四方形。

如果设想将四方四面体的每一个晶面平分成两个不等边的偏三角形晶面，则由这样的 8 个晶面所组成的单形即为复四方偏三角面体。它通过中心的横切面为复四方形。

⑤菱面体与复三方偏三角面体，菱面体由两两平行的六个菱形的晶面组成，上下各 3 个晶面均各自分别交 L^3 于一点，上下晶面绕 L^3 相互错开 60°。

如果设想将菱面体的每一个晶面平分为两个不等边的偏三角形晶面，则由这样的 12 个晶面所组成的单形即为复三方偏三角面体。围绕 L^3 它的上部 6 个晶面与下部 6 个晶面交错排列。

⑥偏方面体类，组成本类单形的晶面都具有两个等边的偏四方形。与双锥类似，上部与下部的晶面分别各自交高次轴于一点，但不同的是围绕高次轴上下部晶面不是上下相对，而是错开了一定角度。

三方偏方面体，上下部各有 3 个晶面，共由 6 个晶面组成，通过中心的横切面为复三方形。见于 $L^3 3L^3$ 对称型中。

四方偏方面体，上下部各有 4 个晶面，共由 8 个晶面组成，通过中心的横切面为复四方形。见于 $L^4 4L^2$ 对称型中。

六方偏方面体，上下部各有 6 个晶面。共由 12 个晶面组成，通过中心的横切面为复六方形。见于 $L^6 6L^2$ 对称型中。

3. 高级晶族的单形

高级晶族共有 15 个单形，为了便于描述和记忆，我们将其分为三组。

①四面体组

四面体，由 4 个等边三角形晶面所组成。晶面与 L^3 垂直；晶棱的中点出露 L^2 或 L_i^4。

三角三四面体，犹如四面体的每一个晶面突起分为 3 个等腰三角形晶面而成。

四角三四面体，犹如四面体的每一个晶面突起分为 3 个四角形晶面而成。四角形的 4 个

边两两相等。

五角三四面体，犹如四面体的每一晶面突起分为 3 个偏五角形晶面而成。

六四面体，犹如四面体的每一晶面突起分为 6 个不等边三角形而成。

②八面体组

八面体，由 8 个等边三角形晶面所组成。晶面垂直 L^3。

与四面体组的情况类似，设想八面体的每一个晶面突起平分为 3 个晶面，则根据晶面的形状分别可形成三角三八面体、四角三八面体、五角三八面体。而设想八面体的一个晶面突起平分为 6 个不等边三角形则可以形成六八面体。

③立方体组

立方体，由两两相互平行的 6 个正四边形晶面所组成，相邻晶面间均以直角相交。

四六面体，设想立方体的每个晶面突起平分为 4 个等腰三角形晶面，则这样的 24 个晶面组成了四六面体。

五角十二面体，设想立方体每个晶面突起平分为两个具 4 个等边的五角形晶面，则这样的 12 个晶面组成五角十二面体。

偏方复十二面体，设想五角十二面体的每个晶面再突起平分为两个具两个等长邻边的偏四方形晶面，则这样的 24 个晶面组成偏方复十二面体。

菱形十二面体，由 12 个菱形晶面所组成。晶面两两平行。相邻晶面间的交角为 90°～120°。

总结以上，几何单形共 47 种。从不同的角度出发，又可将它们做如下的几种划分：

一般形与特殊形

这是根据单形晶面与对称要素的相对位置来划分的。凡是单形晶面处于特殊位置，即晶面垂直或平行于任何对称要素，或者与相同的对称要素以等角相交，则这种单形即称为特殊形；反之，单形晶面处于一般位置，即不与任何对称要素垂直或平行（等轴晶系中的一般形有时可平行三次轴的情况除外），也不与相同的对称要素以等角相交，则这种单形称为一般形。

一个对称型中，只可能有一种一般形，晶类即以其一般形的名称来命名。在表 1.4.1 中，各对称型中所列出的第一个单形即为该对称型的一般形。

开形和闭形

根据单形的晶面是否可以自相闭合来划分，凡是单形的晶面不能封闭一定空间者称开形，例如平行双面、各种柱等等；反之，凡是其晶面可以封闭一定空间者，则称为闭形，例如各种双锥以及等轴晶系的全部单形等等。

左形和右形

互为镜像，但不能以旋转操作使之重合的两个图形，称为左右形。

从几何形态来看偏方面体、五角三四面体和五角三八面体都有左形和右形之分（参看表 1.4.2 各单形的形态）。识别它们的左右可采用如下的办法：

对于偏方面体，可以上部晶面的两个不等长的边为准，长边在左者为左形，长边在右者为右形。

对于五角三四面体（图 1.4.5），在其两个 L^3 的出露点之间可以找到由三条晶棱组成的一条折线，我们还可以联系两个 L^3 的出露点再作一条假想的直线来辅助观察，若组成折线的最下边的一条晶棱偏向左上方，即为左形；反之，即为右形。

对于五角三八面体（图 1.4.6），在其两个 L^4 的出露点之间也可找到由三条晶棱组成的一条折线，我们再联系该两个 L^4 的出露点作一条假想直线来辅助观察，若折线中最上边的一条晶棱偏向直线的左下方，即为左形；反之，则为右形。

左右形只出现于仅具对称轴而不具对称面、对称中心和旋转反伸轴的对称型中。若不仅考虑外形而同时考虑其本身的对称性的话，则属于这类对称型的全部单形应均有左形和右形的区分。

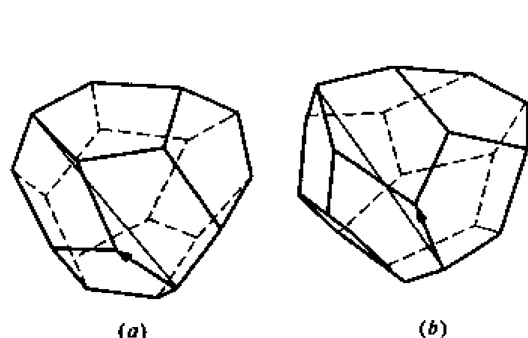


图 1.4.5 五角三四面体的左形(a)和右形(b)

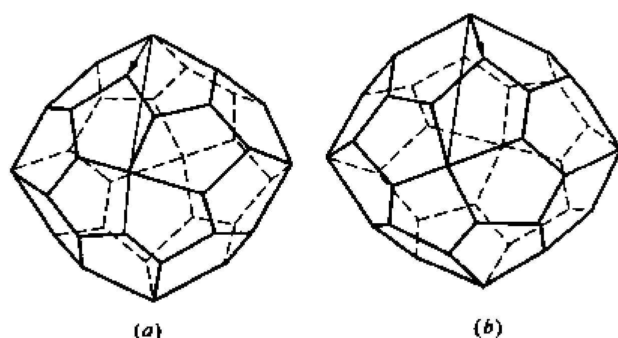


图 1.4.6 五角三八面体的左形(a)和右形(b)

正形和负形

取向不同的两个相同的单形，如果相互间能借助旋转操作而彼此重合者，则互为正负形。例如图 1.4.7 和图 1.4.8 分别表示出四面体和五角十二面体的正形和负形，它们的负形相当于正形旋转了 90°。

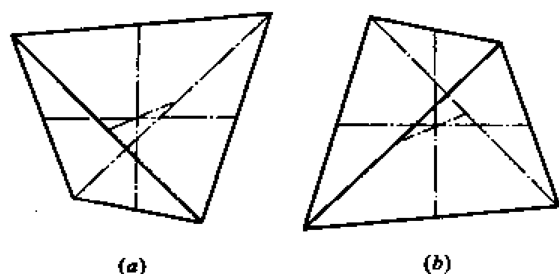


图 1.4.7 四面体的正形(a)和负形(b)

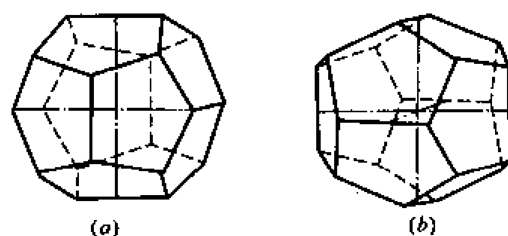


图 1.4.8 五角十二面体的正形(a)和负形(b)

定形和变形

一种单形其晶面间的角度为恒定者，属于定形；反之，即为变形。属于定形者有单面、平行双面、三方柱、四方柱、六方柱、四面体、立方体、八面体和菱形十二面体九种单形；其余单形皆为变形。以变形五角十二面体为例，图 1.4.9 表示了它的面角随晶面指数的不同而变化。

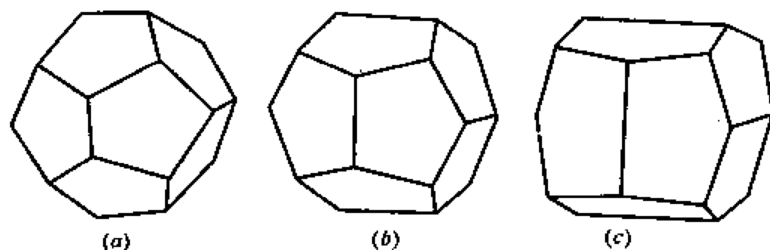


图 1.4.9 具有不同面角的五角十二面体

(a) {320}；(b) {210}；(c) {410}

4.2 聚　形

4.2.1 聚形的概念

两个以上的单形的聚合称为聚形。

图 1.4.10、图 1.4.11 分别表示了四方柱和四方双锥、立方体和菱形十二面体的聚合，用粗线勾画出了它们的聚形的形态。

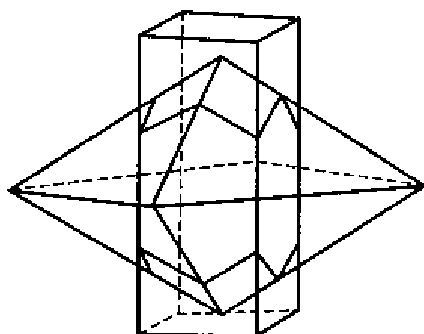


图 1.4.10　四方柱和四方双锥的聚形

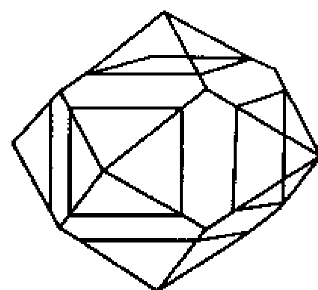


图 1.4.11　立方体和菱形十二面体的聚形

显然，有多少种单形相聚，其聚形上就会出现多少种不同的晶面，它们的性质各异；对于理想形态而言，同一单形的晶面同形等大。

从图 1.4.10、图 1.4.11 中尚可以看出，在聚形中，各单形的晶面数目及晶面的相对位置都没有改变；但由于单形彼此相互割切，致使晶面的形状与原来在单形中相比，可能会有所变化。因此，决不能依据晶面的形状来判定组成该聚形的单形的名称。

单形的聚合不是任意的，必须是属于同一对称型的单形才能相聚；换句话说，也就是聚形也必属于一定的对称型，因此，聚形中的每一单形的对称型当然都与该聚形的对称型一致。

判别一个聚形由何种单形所组成，可依据对称型、单形晶面的数目和相对位置、晶面符号以及假想单形的晶面扩展相交以后设想单形的形状等，进行综合分析。

4.2.2 聚形的特点

①聚形在形状上的最大特点是出现了结晶学上不相等的晶面，而且这些晶面之间并无对称要素联系着，因为在聚形中，不同单形其晶面与对称要素的位置不同，它们之间不能利用对称要素与一原始晶面的操作将聚形中全部晶面推导出来。

②当晶体成理想形态时，在聚形中，由于单形是能借助于对称要素的作用而相互联系起来的一组晶面的组合，因此属于同一单形的各个晶面，必定具有相同的形状、大小，且物理、化学等性质也完全相同，不同单形的晶面，则形状大小、性质等也就不会相同。有多少单形，就会有多少种不同的晶面。因此，聚形中晶面的种类就等于单形的个数。

③聚形中不同单形的晶面，由于相互切割的结果，往往与该单形单独存在时的形状不同，如图 1.4.12 四方双锥的等腰三角形变成菱形。图 1.4.13 六面体的正方形变成了菱形。因此，在聚形中绝不能只根据晶体上已有晶面的形状来决定它是哪一种单形，为了获得某一单形单独存在时的形状，可假想其他单形不存在，而将这一单形的所有面用扩展相交的办法恢复原

状(图 1.4.12、图 1.4.13),绝不要把属于同一单形的晶面分开,也不要把属于不同单形的晶面合并。

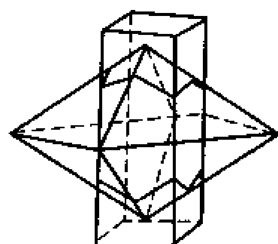


图 1.4.12 聚形:四方柱和四方双锥

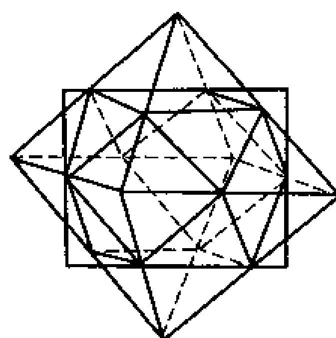


图 1.4.13 聚形:六面体和八面体

④聚形不能由任何的单形聚合而成,只有属于同一对称型的单形才能在一起形成聚形。这是因为聚形是格子构造中两种或两种以上的面网形成的晶面的组合,必属于一定的对称型,而聚形中各单形的晶面相当于同一格子构造的相应面网,那么组成聚形的各单形的对称程度一定相同,即聚形中各单形是由相同的对称要素联系起来的。

如图1.4.12的四方柱和四方双锥均属于 $L^4 4L^2 5PC$ 对称型,绝不会出现分属于不同对称型的单形相聚的现象。如不能出现立方体与四方双锥、八面体与平行双面等相聚的情况,这说明单形的相聚是有规律的,即必须符合对称程度相等的条件。

⑤由于每种对称型所能推导出的单形最多不超过七种,因此聚形中单形的种类最多也不会超过七种,但在一个聚形上所可能出现的单形个数却无一定的限制,可以有两个或几个相同的单形同时并存。如图 1.4.14 为锆石晶体中的两种聚形,图(a)为两个四方双锥、一个四方柱,图(b)为两个四方柱、一个四方双锥。

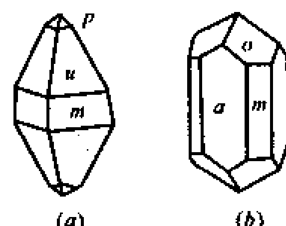


图 1.4.14 锆石晶体中的两种聚形

a—四方柱{100};m—四方柱{110};

p—四方双锥{111};u—四方双锥{331}

4.2.3 聚形的分析方法

聚形的种类多至无穷,但都是由 47 种单形的某一些聚合而成,鉴定聚形时,最主要的任务就是要分析这一聚形是由哪一些单形组成的。

分析聚形的步骤如下:

①找出聚形中所有的对称要素,确定对称型及所属晶系,这样有助于鉴别单形,因为属于同一对称型的单形只有固定的几种。

②观察聚形上有几种不同的晶面(理想形态表现为大小形状不同,真实晶体上表现为晶面特征不同),把同形等大的晶面归在一起,从而决定是由几个单形所组成。一般是有几种不同形状、大小的晶面就有几个单形。

③数一下相同晶面的数目。

④根据晶面数目、晶面的相对位置、晶面与对称要素之间的关系,对相同晶面采用扩展相交的办法,恢复理想形状,从而确定单形的名称。

⑤最后可根据对称型利用表 1.4.1 查对所定单形名称是否有误。

依图 1.4.15 的橄榄石晶体分析聚形中单形如下：

①它所属的对称型为 $3L^2 3PC$ 属斜方晶系。

②观察晶体具有 a、b、c、d、e、m、k 七种不同的晶面，从而可以确定是由 7 个单形所组成。

③每个相同晶面的数目：

a：2 个；b：2 个；c：2 个；d：4 个；e：8 个；m：4 个；k：4 个。

④根据晶面数目、晶面的相对位置，用扩展相交的办法，确定单形。

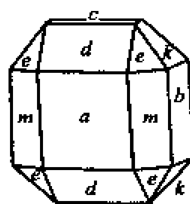


图 1.4.15　橄榄石晶体

$3L^2 3PC$；平行双面：c、a、b；斜方柱：m、d、k；斜方双锥：e

a、b、c：各具有两个相互平行的晶面，皆为平行双面。

d、m、k：各具有 4 个晶面，它们扩展相交时相交的棱彼此平行组成横切面为菱形的柱，因而这三种单形都是斜方柱。

e：具有 8 个晶面，晶面扩展后每相邻的 4 个面都汇聚于一点，因此，应为斜方双锥。

最后查对表 1.4.1，看所定的单形与对称型 $3L^2 3PC$ 一行所列单形是否有误。否则，再重新考虑。

对于天然的矿物晶体，同一单形的晶面常常并不是同形等大的，必须根据晶面的特征来区分单形和定对称型。

5 晶体定向和晶体符号

前两章我们讨论了晶体的对称以及晶体的理想形态——单形，及从聚形中分析单形的基本知识。但是在描述一个晶体时，仅仅确定了一个晶体的对称和单形，仍不一定能获得关于它的形态的完整概念。如图 1.5.1 所示的两个晶体，都属于 $L^4 4L^2 5PC$ 对称型，并且，都是由四方柱和四方双锥组成的聚形，但在形态上却有很大的差异。这说明根据晶体形态可以描述晶体的对称型，但用晶体的对称型来描述一个晶体的具体形状则较困难。此问题实质上是晶面在空间的相对位置的问题。由于晶面在空间的相对分布有差异，因而具有不同的形态。因此，要确切地描述晶体的形状还必须讨论下面两个方面的内容：一是要研究晶体各部分即晶面、晶棱以及单形等在晶体上的方向，并用一定符号来表示它们，这就是所谓的晶体符号（包括晶面符号、晶棱符号、单形符号）。二是在确定晶体符号前，必须先在晶体上建立一个坐标系，即在晶体中选择坐标轴和确定各晶轴上单位长（轴单位）之比（轴率），这就是晶体定向。

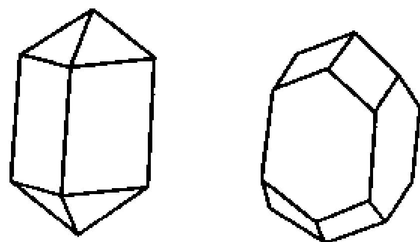


图 1.5.1 由四方柱和四方双锥组成的两种不同的聚形

显然，对于任何一个晶体的研究，只有在晶体定向之后，才有可能描述各种晶体符号。

5.1 晶体定向与晶体常数

5.1.1 晶体定向

晶体定向就是在晶体中确定坐标系统，具体来说就是在晶体上选择坐标轴（晶轴）和确定各晶轴上单位长（轴单位）之比（轴率）。

晶体定向原则：

①应符合晶体所固有的对称性。因此，晶轴应与对称轴或对称面的法线重合；若无对称轴和对称面，则晶轴可平行晶棱选取。

②在上述前提下，应尽可能使晶轴垂直或近于垂直，并使轴长趋近于相等，即尽可能使之趋向于 $\alpha=\beta=\gamma=90°$，$a=b=c$。

1. 晶轴的选择

晶轴系交于晶体中心的三条直线，它们分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴；对于三方和六方晶系为四轴定向，增加一个 U 轴。

根据晶体定向的原则，那么在选择晶轴时，要找晶体上平行于晶体构造中的行列方向，因为只有把行列作为晶轴时，晶面在晶轴上的截距系数之比才成简单整数比（后面再介绍）。从晶体外形上来说，平行于格子构造行列的方向有晶棱（包括晶体上实际存在的晶棱和有可能出现的晶棱）方向，此外还可以证明，对称轴、对称面法线的方向，也是平行于格子构造行列方向

的。

我们在考虑晶轴的选择时，其顺序是这样的：如晶体是有对称轴的，则选对称轴的方向为晶轴；缺少对称轴时，则选对称面法线方向为晶轴；如对称轴和对称面都没有，则选平行于晶棱的方向为晶轴（因晶棱不通过晶体中心，所以选平行晶棱的方向，它可平移至晶体中心）。各晶轴的交点应位于晶体的中心。

晶轴的安置：

①三个晶轴的情况，如图 1.5.2 所示。

符号为 X、Y、Z（有的采用 a、b、c 或 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）。X 轴称前后轴，位于前后方向，Y 轴称左右轴，位于左右方向，Z 轴称直立轴，永远置于直立方向。各晶轴均有正、负端之分，各轴自中心向上、前、右为正端，向下、后、左为负端。

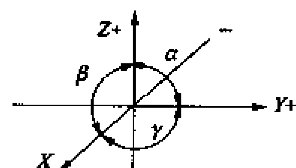


图 1.5.2　三个晶轴的方位及轴角

各晶轴之间有一定的夹角关系，这些夹角有一定的名称和代号。

凡两个晶轴正端之间的夹角，称为轴角，代号为 α、β、γ，分别是：Y 轴 $\wedge$ Z 轴 $=\alpha$；X 轴 $\wedge$ Z 轴 $=\beta$；X 轴 $\wedge$ Y 轴 $=\gamma$。

②四个晶轴的情况，如图 1.5.3 所示。

三方晶系和六方晶系由于对称特点，常选用四个晶轴，符号为 X、Y、Z、U。一个直立轴 Z 轴，三个水平轴 X、Y、U 轴，Z 轴、Y 轴之方位及正负端同三个晶轴情况，而 X 轴正端则为前后方向偏左方 30°，U 轴负端在前后方向上，偏右方 30°，水平轴 X、Y、U 之间，任何二晶轴正端的夹角都为 120°（图 1.5.4），它们与 Z 轴保持垂直关系。

轴角关系：Y 轴 $\wedge$ Z 轴 $=90°$；X 轴 $\wedge$ Z 轴 $=90°$；X 轴 $\wedge$ Y 轴 $=120°$。

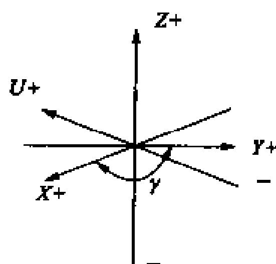


图 1.5.3　四个晶轴的方位及轴角

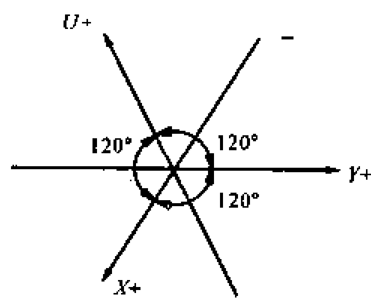


图 1.5.4　四晶轴中、三个水平轴之间的关系

2. 决定晶轴上轴单位及比值和单位面选择

轴单位：是格子构造中平行晶轴的该行列的结点间距，它们的绝对长度是晶胞的三根棱长 a、b、c（如图 1.5.5）。

单位面：晶面在各晶轴上所截的线段，正好是各行列上的结点间距，因此单位面也是面网密度最大的面网（图 1.5.6 中 HLK）。

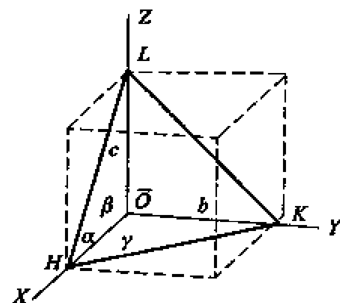


图 1.5.5　晶体常数与晶胞形状的关系

由于结点间距极小，以单位 Å（1Å $=10^{-8}$ cm）来计算，这只有用 X 射线分析方能测定，根据晶体外形是不能定出轴单位的真长，同时，在晶体外形上定向重要的是晶面和晶棱的方向问题，而不在于它们具体位置的远近。因此，我们可以无须知道三个轴单位的绝对长度，只需求出他们的比率 $a:b:c$ 就可以了，这个比率

($a:b:c$)称为轴率。

根据轴率，单位面的定义也可以说成：在各晶轴上所截的截距之比等于轴率的晶面，即为单位面。

那么在实际晶体中，若出现平行这一面网(单位面)的晶面，也称为单位面，只要晶面在三个晶轴上的截距的比例等于 $a:b:c$(轴率)就可以了。

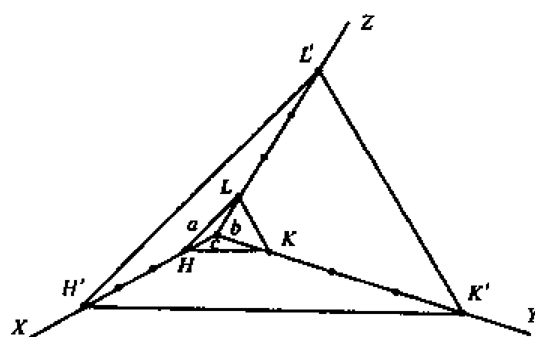


图 1.5.6 单位面

如图 1.5.6 所示，晶面($H'L'K'$)在三个晶轴所截的距离分别为 $5a$、$5b$、$5c$。那么它们的比率为 $5a:5b:5c=a:b:c$，这一比率即在三个晶轴上所截的截距之比，等于轴率，所以晶面 $H'L'K'$ 也为单位面。

在轴率 $a:b:c$ 比例中，一般以 b 为单位长，即比例的各项都除以 b，结果在具体轴率数值中，b 项始终为 1，如自然硫 $a=10.437$Å，$b=12.485$Å，$c=24.369$Å。比率为 $10.437:12.485:24.369=0.813:1:1.897$。轴率为 $a:b:c=0.813:1:1.897$。

又如，橄榄石晶体的轴率 $a:b:c=0.46575:1:0.58651$ 也是如此求得。

选择单位面的原则是尽可能使 a、b、c 相等或接近相等，但必须与各晶系晶胞的形态特点相结合(见后)。

5.1.2 晶体常数

晶体的轴角(α、β、γ)和轴率($a:b:c$)称为晶体常数。如果轴角 α、β、γ 和单位长已知，就可以知道晶胞(空间格子中单位平行六面体)的大小和形状，如果只知轴角 α、β、γ 和轴率 $a:b:c$，虽然不知晶胞的大小，但可定出晶胞的形状。

各晶系的对称特点不同，因而各有其具体选择晶轴的方法。其晶体常数特点也不一样。现将它们综合列于表 1.5.1。

表 1.5.1 各晶系选择晶轴的原则及晶体常数特点

晶 系	选择晶轴的原则	晶体常数特点
等轴晶系	以相互垂直的 L^4 或 L_i^4 为晶轴，无 L^4 或 L_i^4 时以相互垂直的 L^2 为晶轴	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90°$
四方晶系	以 L^4 或 L_i^4 为 Z 轴，以垂直 Z 轴并相互垂直的 L^2 或 P 的法线为 X、Y 轴。当无 L^2 或 P 时，X、Y 轴平行晶棱选取	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90°$
三方晶系及六方晶系	以 L^3、L^6、L_i^6 为 Z 轴，以垂直 Z 轴并彼此以 120°相交(正端间)的 L^2 或 P 的法线为 X、Y、U 轴，无 L^2 及 P 时 X、Y、U 轴平行晶棱选取	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=90°$ $\gamma=120°$
斜方晶系	以相互垂直的三个 L^2 为 X、Y、Z 轴；在 L^22P 对称型中以 L^2 为 Z 轴，两个 P 的法线为 X、Y 轴	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90°$
单斜晶系	以 L^2 或 P 的法线为 Y 轴，以垂直 Y 轴的主要晶棱方向为 X、Z 轴	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\gamma=90°$ $\beta>90°$
三斜晶系	以不在同一平面内的三个主要晶棱的方向为 X、Y、Z 轴	$a\neq b\neq c$ $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90°$

5.2 晶面符号

1. 晶面符号的概念

晶体定向后，晶面在空间的相对位置即可根据它与晶轴的关系予以确定。这种相对位置可以用一定的符号来表征。表征晶面空间方位的符号，称为晶面符号。

晶面符号有多种形式，通常所采用的是米氏符号，系英国人米勒尔(W. H. Miller)于1839年所创。

2. 整数定律

晶面在晶体上的方向，是根据它与各晶轴的交截情况来决定的，但是，晶面与晶轴交截时，有什么规律呢？这就是我们要讲的整数定律。

整数定律又称有理指数定律，是由法国学者阿羽依(R. J. Haug)于1774年发现的，又称阿羽依定律(阿羽依在当时不可能知道 a、b、c 的长度，但他发现"晶体上任意二晶面在三个相交于一点且不在同一平面内的晶棱上的截距的比值之比为简单整数比")。

整数定律内容：晶面在晶轴上的截距系数之比为简单整数比。

如图1.5.7所示，某一晶面 HKL 在三个晶轴上的截距为 $OH=2a$，$OK=3b$，$OL=6c$，2、3、6称为截距系数，2∶3∶6为截距系数之比。

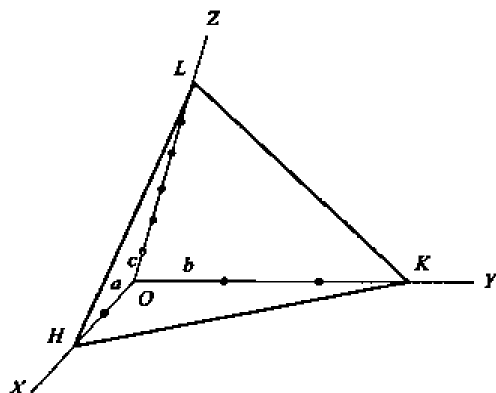


图1.5.7 晶面符号图解

晶面在晶轴上的截距系数之比为简单整数比是由晶体内部构造所决定的，现对整数定律证明如下：

整数比的问题

①由于晶面是晶体构造最外面的一层面网，面网是由分布在一个平面上的结点所构成的，而晶轴又是晶体构造中的行列，所以晶面与晶轴交截的地方就是结点所在的位置，因此，晶面在晶轴上的截距将是该晶轴上结点间距的整数倍，那么截距系数之比，也因而成整数比。

②如果晶面与晶轴相交不在结点上，而是在结点之间，此定律也是成立的。

如图1.5.8所示，有一垂直于纸面、平行于 Z 轴的晶面 Kb_5，在 Y 轴上截距为 Ob_5，在 X 轴上截距为 OK，交点 K 位于结点 a_2 与 a_3 之间，有两种方法证实：

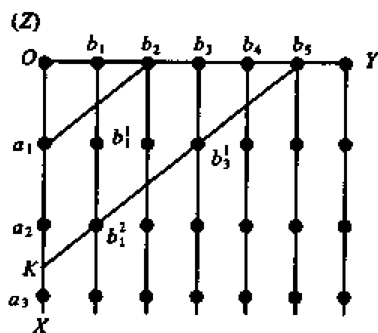


图1.5.8 晶面与晶轴相交在结点之间

a)既然交点 K 不在结点上但晶面上总可找到与行列相交的结点如 b_1^2 和 b_3^1，现在来看 b_1^2 的情况，从图中看出 $OK /\!/ b_1b_1^2$。所以 $\triangle Okb_5 \sim \triangle b_1b_1^2b_5$，那么

$$\frac{OK}{Ob_5}=\frac{b_1b_1^2}{b_1b_5}=\frac{2}{4}=\frac{1}{2} \quad 即\ OK : Ob_5 = 1:2$$

因此，他们的截距系数之比仍为整数比(结点 b_3^1 的情况一样)。

b)将晶面平移(平移后，在各晶轴上的截距之比

不变)，使之截晶轴于结点上，这时，它们截距系数之比也为整数比。如图 1.5.8。

$$Kb_5 \parallel a_1b_2$$

则$\triangle OKb_5 \sim \triangle oa_1b_2$。

$$\frac{OK}{Ob_5}=\frac{Oa_1}{Ob_2}=\frac{1}{2} \quad 即\ OK:Ob_5=1:2$$

总之，不论在什么情况下，由于晶体构造的限制，晶面在晶轴上的截距系数之比均为一个整数比。

简单的问题

如图 1.5.9，平行 Z 轴有一组面网，它们与 X 轴相交于 a_1，与 Y 轴则分别交于 b_1、b_2、b_3、b_4…、b_n，从结点间距来看：

$a_1b_1<a_1b_2<a_1b_3<\cdots<a_1b_n$

从面网密度来看：

$a_1b_1>a_1b_2>a_1b_3>\cdots>a_1b_n$

其在 X、Y 晶轴上的截距系数之比则分别为：

$a_1b_1=1:1$

$a_1b_2=1:2$

$a_1b_3=1:3$

…………

$a_1b_n=1:n$

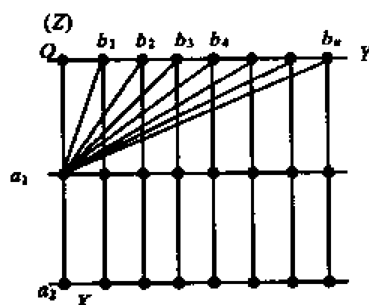


图 1.5.9　面网密度与截距比值的关系

可知，截距系数之比随着面网密度的增大而愈简单。

根据布拉维法则，晶体被面网密度较大的晶面所包围，因此晶面的截距系数之比愈简单，愈常出现在晶体上。

3. 晶面符号的求法

根据晶体定向和整数定律，就可以很方便地确定晶体的晶面在空间的相对位置，并可用一些简单的数字来表示，具体求法如下：

①确定各晶轴上的截距系数；

②将截距系数写成倒数比；

③乘以分母的最小公倍数；

④去掉比例点，加圆括号，即晶面符号。

实例一

如图 1.5.10，晶面 HKL 在 X、Y、Z 三轴上的截距为：

$OH=2a$

$OK=3b$

$OL=6c$

2、3、6 为截距系数。

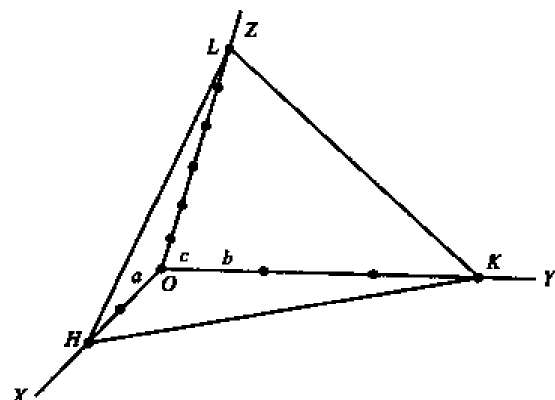


图 1.5.10　晶面符号与截距的图解

截距系数倒数比为：$\frac{1}{2}:\frac{1}{3}:\frac{1}{6}$。化简，乘以分母的最小公倍数得：$\frac{1}{2}:\frac{1}{3}:\frac{1}{6}=3:2:1$。

去掉比例点，加圆括号，晶面 HKL 的米氏符号则为(321)，括号内的数字称为晶面指数。

由于晶面在晶轴上截距系数为简单整数比，所以晶面指数也是简单整数，一般不超过 6，超过 6 的晶面只在少数情况下出现。

实例二

如图 1.5.11 为一立方体，通过晶体中心三根轴（实为 $3L^2$）为 X、Y、Z 轴，轴单位 a、b、c 而且等长。

晶面 $ABCD$ 与 Y 轴、Z 轴平行，截距为∞，与 X 轴相截，截距为 a。

截距系数$\frac{a}{a}$、$\frac{\infty b}{b}$、$\frac{\infty c}{c}$为 1、∞、∞。

截距系数倒数比为：$\frac{1}{1}:\frac{1}{\infty}:\frac{1}{\infty}=1:0:0$

所以晶面 $ABCD$ 的晶面符号为(100)，同理，其他晶面的晶面符号为($\bar{1}$00)、(010)、(0$\bar{1}$0)、(001)、(00$\bar{1}$)。

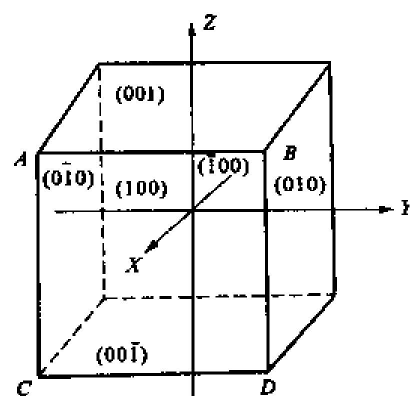


图 1.5.11 立方体的晶面符号

实例三

如图 1.5.12 为一斜方双锥，交于晶体中心，三根晶轴为 X、Y、Z 轴，它们轴单位为 a、b、c。

晶面 XYZ 在三个晶轴上的截距分别为 $2a$、$3b$、$6c$。截距系数$\frac{2a}{a}$、$\frac{3b}{b}$、$\frac{6c}{c}$为 2、3、6。截距系数倒数比为：$\frac{1}{2}:\frac{1}{3}:\frac{1}{6}$，化简为 3：2：1，所以晶面 XYZ 的晶面符号为(321)。

同理，晶面 $XY'Z$ 的晶面符号为(3$\bar{2}$1)，不过晶面在 Y 轴负端相截。

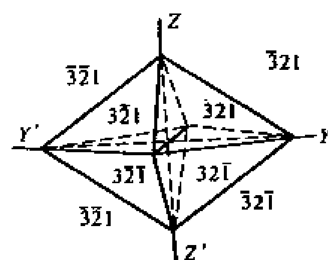


图 1.5.12 斜方双锥的晶面符号

应当指出，在实际应用上，主要问题不在于如何具体测算晶面符号，各种晶体的晶面指数具体数值的确定，则是专门结晶学工作者的任务，我们是着重对前人已做的成果，要尽量熟悉它，同时对晶体的晶面符号要深刻理解，即能够做到一见某晶面符号后，要明白它的含义，想象出它在晶体上的方位。

因此，有必要再介绍一下晶面符号使用时，应注意的几个问题。

①晶面指数的排列有统一的固定顺序，是按照 X、Y、Z 轴顺序排列的，此顺序不得颠倒，如晶面 HKL 的晶面指数为(321)（图 1.5.12），是对应于 X、Y、Z 轴，不能写成(231)或(132)。

②由于晶面指数是截距系数的倒数比，所以晶面在晶轴上的截距系数愈大，则在晶面符号中与该轴相对应的指数将愈小，如果晶面平行于该轴，则截距为∞，晶面指数为 0，如晶面符号为(301)的晶面，可知该晶面与 Y 轴平行，又如(001)晶面符号，则可知该晶面与 X、Y 轴平行。如图 1.5.11 所示。

③晶面符号可表示出在各轴所截单位数的比例，例如(111)说明晶面与三晶轴所截单位数相等，(321)说明与三晶轴所截单位数不等，分别为$\frac{1}{3}$、$\frac{1}{2}$和 1 个单位，(211)则说明与 Y、Z 轴所截单位数相等，且恰好为 X 轴单位数的 2 倍，(110)则说明与 X、Y 轴所截单位数相等，与 Z 轴平行。

④如果只知道晶面与晶轴是相交截的，但不能确定其截距系数的比值时，这类晶面的符号可用英文字母表示，若是平行某晶轴时，仍用“o”表示，如(hkl)、(hol)等。

⑤由于晶轴有正、负端之分，因而晶面指数则要根据晶面与晶轴截于正端或负端的情况，亦应有正负之分，表示时在其符号之上加“—”(负号)如$(\bar{3}21)$、$(3\bar{2}1)$，前者说明晶面在 X 轴负端相截，后者则在 Y 轴负端相截。

⑥同一晶体上，任何两个互相平行的晶面，它们对应的晶面指数的绝对值都是相同的，但正、负号彼此恰恰相反。例如$(1\bar{3}0)$与$(\bar{1}30)$就代表一对相互平行的晶面。

⑦任一单形不论其晶面数多少，其各晶面的各个指数是相同的，只是有正、负的变化和顺序的变化。例如立方体 6 个晶面的晶面符号分别为：(100)、$(\bar{1}00)$、(010)、$(0\bar{1}0)$、(001)、$(00\bar{1})$，其中都是两个指数为零，一个为 1，但有正、负和顺序的变化。

⑧晶面符号为(111)者，这种晶面称为单位晶面，实际上是与三晶轴相截，而截距系数又相等的晶面，它的作用特别是在中、低晶族中，往往利用单位晶面，去比较和确定其他晶面的晶面符号。

掌握以上 8 点，就可判断晶体任何晶面的晶面符号及其所代表的意义和晶面位置。

4. 四轴定向的晶面符号

在晶体的四轴定向中，由于有 4 个结晶轴，相应的每个晶面就有 4 个晶面指数，固定顺序是 X、Y、U、Z 轴，其晶面符号一般式为$(hkil)$与 4 个结晶轴相对应，不能颠倒。

但是在这 4 个指数中其 3 个水平轴上的指数之和，永远等于零，即 $h+k+i=0$，此关系被称为晶面指数总和定理。

如图 1.5.13，晶面 MM'在 X 轴上截距为 p_1 交于 M，在 Y 轴上截距为 p_2 交于 M'，在 U 轴上截距为 p_3，交负端于 E，作辅助线 EF，使之平行于 Y 轴。由于 3 个水平轴之间的夹角关系，可知：$\triangle OEF$ 为一等边三角形，每边等于 p_3。

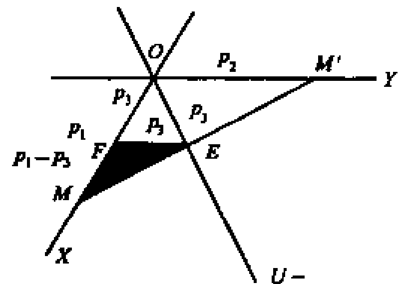


图 1.5.13　证明 $h+R+i=0$ 的图解

由于$\triangle EMF$ 与$\triangle M'MO$ 相似，因此：

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{p_1-p_3}{p_3}$$

以 p_1 除等式两边，则得

$$\frac{p_1}{p_1p_2}=\frac{p_1}{p_1p_3}-\frac{p_3}{p_1p_3},\frac{1}{p_2}=\frac{1}{p_3}-\frac{1}{p_1},\text{那么}\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=\frac{1}{p_3}。$$

因为米氏符号等于截距系数的倒数，所以上式就可变为：$h+k=i$，即 $h+k+(-i)=0$，$h+k+i=0$(i 为负值)

晶面指数总和定理说明：

①在 3 个水平轴的指数中，如果有一个等于零，则其他两个指数必须是大小相同、符号相反。

②若 3 个指数都不等于零，则其中一个指数的绝对值等于另两个指数绝对值之和。

晶面符号的使用，远早于 X 射线的发现，因此当时不可能知道 a、b、c(结点间距)的真长，只是根据晶体外形来确定晶面符号，具体的确定方法，举例说明如下：

利用晶轴轴单位相等关系定晶面符号

此法适用于等轴晶系晶体及中级晶族晶体上平行 Z 轴晶面符号的确定。这是因为它们的轴单位 $a=b=c$ 或 $a=b\neq c$ 的特点决定的。

如图 1.5.14 为黄铁矿晶体(五角十二面体),其对称型为 $3L^2 4L^3 3PC$,属等轴晶系。

根据定向原则:选互相垂直的 $3L^2$ 为 X、Y、Z 轴,轴角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,3 个晶轴的轴单位是相等的,即 $a=b=c$,由于轴单位相等,故要确定各晶面与三晶轴的截距系数与晶面符号,只需根据该晶面与三晶轴相截长度的比例即可判断。如长度相等,截距系数也因而相等,则晶面符号为(111)。若长度不等,则截距系数视该晶面在各轴上截距的长短比例判定,从而定出晶面符号。

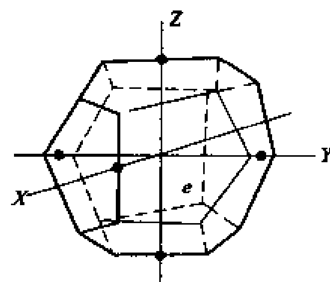


图 1.5.14 利用轴单位相等定晶面符号图解

如图 1.5.14 中,黄铁矿的五角十二面体的 e,晶面扩展后与 X 轴、Y 轴的正端皆相截,而与 Z 轴则平行,其截距长度在 Y 轴上的是 X 轴上的 2 倍,在 Z 轴上 ∞,它在三晶轴上的截距系数之比为 $1:2:\infty$,其倒数比为 $\frac{1}{1}:\frac{1}{2}:\frac{1}{\infty}=2:1:0$,故晶面 e 之晶面符号为(210),其他 11 个晶面亦可用上法求得如下:

$(2\bar{1}0)$、(021)、$(02\bar{1})$、(102)、$(10\bar{2})$、$(\bar{2}\bar{1}0)$、$(\bar{2}10)$、$(0\bar{2}\bar{1})$、$(0\bar{2}1)$、$(\bar{1}0\bar{2})$、$(\bar{1}02)$

利用单位晶面定晶面符号

此法对中、低级晶族晶体晶面符号的确定是适用的,这是因为它们的轴单位不等或不全等,即 $a=b\neq c$,或 $a\neq b\neq c$。直接以晶面与各轴截距长度比是无法知道其截距系数的,晶面符号也就不能写出具体数值。而用单位晶面就可解决晶面符号的问题。

由于单位晶面截距系数是相同的,即晶面符号为(111),因此可利用其截距长度作为量度单位,以确定其他晶面的截距系数和晶面指数,现举例说明如下:

图 1.5.15 为自然硫的晶体形态,它是由两个斜方双锥组成的聚形,对称型为 $3L^2 3PC$,属斜方晶系。

根据斜方晶系定向选轴的原则,选 3 个互相垂直的 L^2 为 X 轴、Y 轴、Z 轴,轴角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,三个晶轴的轴单位不等,即 $a\neq b\neq c$。

首先选择单位晶面,如图所示自然硫晶体上有两个单形共 16 个晶面,选择哪一个呢?根据选单位晶面原则(后面讲),一般是选择与三个晶轴正端相截(包括扩展后相截)的、发育较大的晶面作为单位晶面。图中与三个晶轴直接相截的虽然没有,然而每个面扩展后都可相截,但与三个轴正端相截的只有 S 面和 P 面,而 P 面比 S 面发育,因此应选 P 面为单位晶面。这就是说 P 面与三个晶轴相截的系数相同,即晶面符号为(111)。

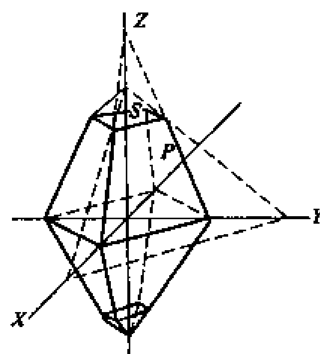


图 1.5.15 利用单位晶面定晶面符号的图解

然后,以 P 面(111)在三个晶轴上的截距长度作量度单位,为 a、b、c。

晶面 S 扩展后与 X 轴、Y 轴、Z 轴分别相交于三点,其截距是:

在 X 轴上截距长度为 $2a$;

在 Y 轴上截距长度为 $2b$；

在 Z 轴上截距长度为 $\frac{2}{3}c$。

于是晶面截距系数的倒数比为：

$\frac{1}{2}:\frac{1}{2}:\frac{3}{2}=1:1:3$

所以晶面 S 的晶面符号为(113)，同样，其他晶面的晶面符号也可求得。

5.3 单形符号

晶体上，一个单形的晶面数目一般不只一个，为表示该单形各晶面的方向，势必要写出所有的晶面符号，显然，这样很烦琐。

根据单形是由对称要素联系起来的一组晶面，晶轴是依对称要素选择的，因此，同一单形的各个晶面与晶轴都有着相同的相对位置，如立方体的每一个晶面都与一个晶轴垂直而与另两个晶轴平行，从而，同一单形的各个晶面的指数的绝对值不变，而只有正、负号和顺序的区别，那么，只要知道了单形的一个晶面符号，则该单形的其他晶面的符号即可导出，这样，我们就可利用选择单形中一个代表晶面的晶面指数来代表一个单形的符号。

单形符号的构成：在单形中选择一个代表晶面，将其晶面指数用大括号“{ }”括起来即成。

如立方体的代表晶面(100)其单形符号为{100}。

又如图 1.5.16 斜方双锥代表晶面(321)，其单形符号为{321}。

代表晶面的选择原则一般是选择正指数最多的晶面，同时还遵守下列原则：

①在中、低级晶族的单形中按“先上、次前、后右”的法则。

②在高级晶族中，则为“先前、次右、后上”的法则。

在中、低级晶族中“先上”就是尽可能使指数“1”为正值，“次前”、“后右”的顺序则是为了尽可能使 $h \geqslant k$。在高级晶族中，“前、右、上”实际上是意味着使 3 个晶面指数尽量为正，由于对称特点，指数“1”为正是必定可以保证的，而“前、右、上”是为了尽可能满足 $h \geqslant k \geqslant 1/1$。

如图 1.5.16 为斜方双锥，属低级晶族斜方晶系。在它的 8 个晶面中，“先上”包括 4 个晶面($\bar{3}\bar{2}1$)、($\bar{3}21$)、($3\bar{2}1$)、(321)；“次前”则只剩下两个晶面($3\bar{2}1$)、(321)；“后右”则只包括(321)一个晶面，因此，其单形符号应为{321}。

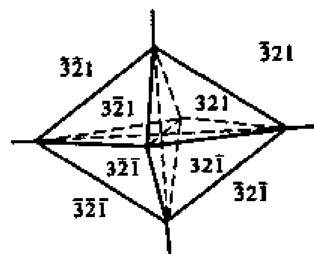
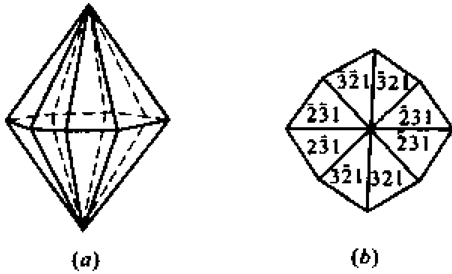


图 1.5.16 斜方晶系 $3L^2 3PC(mmm)$ 对称型的菱方双锥单形

图 1.5.17 为复四方双锥，属中级晶族四方晶系，在它的 16 个晶面中“先上”包括图(b)顶视图中所示的 8 个晶面，“次前”在以上 8 个晶面中最朝前的为(321)、($3\bar{2}1$)两个晶面，“后右”便只剩下(321)一个晶面，因此，其单形符号应为{321}。

图 1.5.18 为六八面体，属高级晶族等轴晶系，由 48 个相同的晶面组成，“先前”同等程度地最朝前的晶面共有 8 个；“次右”这 8 个晶面最偏右的，将是(321)、($32\bar{1}$)两个，“后上”则为

(321)一个晶面，于是，其单形符号为{321}。



(a) (b)

图 1.5.17 四方晶系复四方双锥单形中代表晶面的选择

(a)体视图；(b)顶视图

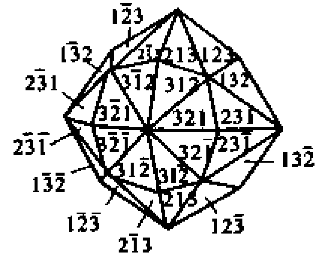


图 1.5.18 等轴晶系六八面体单形中代表晶面的选择

从图 1.5.16、图 1.5.17、图 1.5.18 中可以发现，对于同一单形的各个晶面而言，它们彼此间指数的绝对值肯定是相等的，但不同数字的指数在晶面符号中排列的顺序却有的不变，有的可变，之所以存在这种差别，其根源在于它们的对称程度有差异。

在图 1.5.16 低级晶族中，各晶面不仅指数的绝对值相等，而且各指数的排列顺序亦是严格不变而相互对应的，这是因为其 3 个结晶轴之间不可能为任何对称要素所联系，即各晶轴的性质都不同，因此，属于同一单形的各个晶面其指数的排列顺序必须相同，不允许有丝毫改变，否则就不属于同一单形。

在图 1.5.17 中，各晶面保持指数的绝对值相同，而排列顺序则只限于水平轴（X 轴和 Y 轴）可以轮换，Z 轴保持不变，这是因为各水平轴之间必能借助于晶体中唯一的高次轴的作用而相互对称重复，亦即各水平轴的性质是相同的，但它们与 Z 轴之间则无对称联系，因此，属于同一单形的各个晶面，它们对应于 Z 轴的指数在符号中的排列顺序不能改变，而对应于水平轴的指数则可以相互掉换排列顺序。

在高级晶族中，各晶面也保持指数绝对值相同，而排列顺序在三轴之间则可以互相轮换，这是因为晶体的 3 个晶轴必定能通过晶体所固有的 $4L^3$ 之作用而相互重复，亦即 3 个晶轴的性质都是相同的，因此，假若有一晶面在 3 个晶轴上的截距为 p_a、q_a、r_a 时，则绕 L^3 旋转 120°后，必定有另一截距为 q_a、r_a、p_a 的晶面与之重复；再旋转 120°后，还会有截距为 r_a、p_a、q_a 的晶面也发生重复。显然，这些晶面都应属于同一单形，它们晶面指数的排列顺序则是可以全部轮换的，如图 1.5.18 的(321)同(213)、(132)等。同时在单形符号中，同样的单形符号在不同的对称型中所代表的单形是不同的，如单形符号{hkl}在对称型 L^2PC 中代表斜方柱，在 L^4PC 中代表四方双锥，在 $3L^24L^3$ 中代表五角三四面体等等。另外，同一单形由于晶面方位不同也可以有不同的单形符号，如图 1.5.19 所示。图中为四方柱，由于晶面方位不同，其单形符号有三种：{110}第一四方柱；{100}第二四方柱；{hko}第三四方柱，图中所示为它们的横切面。

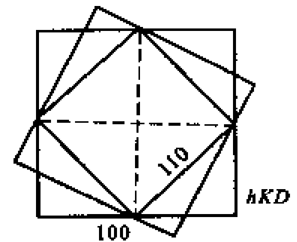


图 1.5.19 四方柱的三种单形符号

依据单形符号，可以帮助我们识别聚形中的单形，以及这些单形在晶体上的方向。

5.4 晶棱符号

与晶面、单形一样，晶棱在晶体上的方向也可用数字符号来表示，用来表示晶体上晶棱方向的数字符号称为晶棱符号。

由解析几何可知，空间的任何直线的方向，可用此直线上任意两点的坐标来确定，晶棱是直线，当然也可用晶棱上任意两点的坐标确定其空间方向，可简述如下：

由于晶棱符号只涉及方向而不涉及具体位置，因此，任何晶棱可以设想使之平移通过晶轴的交点 O，其方向仍然不变。如图 1.5.20 晶棱 OP 为某晶体一条晶棱，将其平移至晶轴交点 O，在 OP 上任取一点 M，O 与 M 的坐标确定后，则晶棱 OP 的方向也就确定了，O 点为晶轴的交点(即原点)，其坐标即 $O(000)$ 可省去，M 点在三晶轴上的坐标设为(X、Y、Z)，则以它除以三晶轴上的轴单位(a、b、c)，其系数即为晶棱 OP 的晶棱符号的指数。

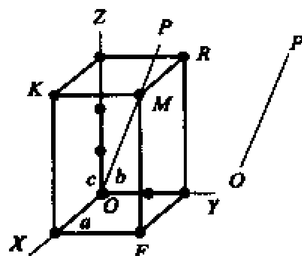


图 1.5.20 晶棱符号图解

如图 1.5.20，M 点的坐标在 X 轴上为 $1a$，Y 轴上为 $2b$，Z 轴上为 $3c$，然后，以轴单位去度量它们(即除以 a、b、c)，则得 $\frac{1a}{a}:\frac{2b}{b}:\frac{3c}{c}=1:2:3$，去掉比例符号，加以方括号“[ ]”即成，故晶棱 OP 的晶棱符号为[123]。

对于晶棱应当指出如下几点：

①与晶面符号指数相似，系数的排列顺序依次与 X、Y、Z 轴相对应，不得颠倒，3 个系数亦应化简为最简单的整数，系数同样有正、负之分，为负值时，在系数的上方加一横，如[$1\bar{2}3$]。

②所有平行的晶棱的符号都是一样的。

③同一晶棱的方向是指向两端的。因此，M 点既可取在晶轴交点的这一侧，也可取在相反的另一侧，则晶棱的符号可由指数绝对值相同、正负号相反的两个晶棱符号来表示，如[123]=[$\bar{1}\bar{2}\bar{3}$]或[$\bar{1}10$]=[$1\bar{1}0$]等等。此点与晶面符号的情况有所不同，对应指数的绝对值相等而正负号完全相反的两个晶面符号，它们分别代表处于原点相对两侧的两个平行晶面，而这样的两个晶棱符号，例如[123]、[$\bar{1}\bar{2}\bar{3}$]则只代表同一晶棱方向。

④平行晶轴的一切晶棱的符号，即为该晶轴之符号，如平行 X 轴者，即为[100]；平行 Y 轴者，即为[010]；平行 Z 轴，即为[001]。系数为 0 者，并不表示晶棱与相应的晶轴平行，而在直角坐标系的情况下，亦即在等轴、四方和斜方 3 个晶系中，系数为零的出现恰恰表示晶棱垂直于相应的晶轴，而晶棱与晶轴平行者，其系数为 1。此点也与晶面符号不同，在晶面符号中，当某个指数为零时，即表示晶面与相应的晶轴平行。

⑤三方和六方晶系采用四轴定向时，似应选用 4 个数字的晶棱符号。但一般常用 3 个指数表示晶棱符号，这是因为 M 点在 3 个水平轴上的坐标距不是唯一的，亦即矢量 OM 在 3 个水平轴上的分矢量，其相互间的关系是不确定的，可以有许多种不同的矢量分解方法，也可以互为消长。为了避免出现这种情况，同时还为了以后与晶面指数在一起进行运算时的方便，通常只考虑对 X 轴、Y 轴、Z 轴三者的关系(晶轴的安置仍与 4 个晶轴时相同，只是撇开 U 轴不考虑)。于是，晶棱符号的确定方法与其他各晶系三轴定向的情况完全相同了。

5.5 晶带与晶带定律

1. 晶带

由布拉维法则可知，晶面都是网面密度较大的面网，所以晶体上所出现的实际晶面数是有限的；相应的，晶面的交棱也应当是结点分布较密的行列，这种行列的方向也是为数不多的；所以晶体上的许多晶棱常具有共同的方向而相互平行。

交棱相互平行的一组晶面的组合，称为一个晶带。

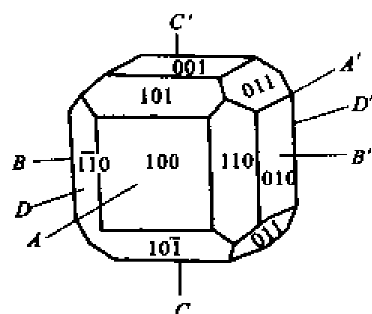


图 1.5.21 晶带

图 1.5.21 绘出了一个晶体及其赤平投影。晶面 $(1\bar{1}0)$、(100)、(110)、(010)、$(\bar{1}10)$、$(\bar{1}00)$、$(\bar{1}\bar{1}0)$、$(0\bar{1}0)$（后 4 个晶面在晶体的后面，晶体图上未绘出）交棱相互平行，组成一个晶带。平行此组平行晶棱，通过晶体中心的直线 CC' 称该晶带的晶带轴，该组晶棱的符号也就是该晶带轴的符号，亦即此晶带的符号为[100]。该晶带上所有晶面的赤平投影点落于同一个大圆上。同理，晶面 (100)、(101)、(001)、$(\bar{1}01)$、$(\bar{1}00)$、$(\bar{1}0\bar{1})$、$(00\bar{1})$、$(10\bar{1})$ 等又组成一个晶带轴为 BB' 的[010]晶带。此外，还可以找出晶带轴为 AA' 的[100]晶带，晶带轴为 DD' 的 $[1\bar{1}0]$ 晶带等等。

2. 晶带定律

晶体是一个封闭的几何多面体，每一晶面与其他晶面相交，必有两个以上的互不平行的晶棱。因此，晶体上任一晶面至少属于两个晶带。这一规律称为晶带定律。它也可以这样来表述：任意二晶棱（晶带）相交必可决定一个可能晶面，而任意二晶面相交必可决定一可能晶棱（晶带）。

根据这一规律，我们可以由若干已知晶面或晶带推导出晶体上一切可能的晶面的位置。在晶体定向、投影和运算中，晶带和晶带定律得到了广泛的应用。

晶带定律和整数定律分别以不同的形式阐述了晶面（面网）与晶棱（行列）相互依存的几何关系。

5.6 各晶系晶体定向及单形符号

不同晶系的对称特点是各不相同的，因此晶轴的选择和确定轴单位也不同，晶体常数特征亦会有所区别，现分别叙述如下：

1. 等轴晶系

①对称特点　本晶系晶体对称的特点是高次轴的数目多于 1，皆有 $4L^3$，并有 3 个相互垂直的 L^4 或 L^2 或 L_i^4。共包括 5 个晶类：六八面体晶类、五角三八面体晶类、偏方复十二面体晶类、六四面体晶类、五角三四面体晶类。

②晶体定向　理想发育的等轴晶系晶体总是沿着 3 个 L^4 或 3 个 L^2 的方向呈三向等长的形态，选择相互垂直的 3 个 L^4 或 L^2 或 L_i^4 为三晶轴（X、Y、Z），并使 Z 轴直立，Y 轴左右，X 轴前后。它们的轴角关系为：$\alpha=\beta=\gamma=90°$。具体为：对称型为 $3L^44L^36L^29PC$ 的晶体和对称型为 $3L^44L^36L^29P$ 的晶体中以 $3L^4$ 作 X、Y、Z 轴；对称型为 $3L^24L^33PC$ 和 $3L^24L^3$ 的晶体以

$3L^2$ 作为 X、Y、Z 轴；对称型为 $3L_i^4 4L^3 6P$ 的晶体以 $3L_i^4$ 作为 X、Y、Z 轴。

由于三晶轴之间必定能够借助于等轴晶系所特有的 $4L^3$ 中任意一个 L^3 的作用（每一个 L^3 与三晶轴构成等角度相交）而发生对称重复，即三晶轴的性质应该是完全相同，它们的轴单位也应是等长的，即：

$a=b=c$　　轴率 $a:b:c=1:1:1$

在等轴晶系所有晶体中，晶体常数特点相同，即 $a:b:c=1:1:1$，$\alpha=\beta=\gamma=90°$。

③单形符号　等轴晶系共包括 15 种单形，它们的定向及单形符号见图 1.5.27。

④举例　方铅矿 PbS，对称型为 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，选 $3L^4$ 为 X、Y、Z 轴，晶体常数特点为 $a:b:c=1:1:1$，$\alpha=\beta=\gamma=90°$，$a=5.936$Å，单形及单形符号为：立方体{100}、八面体{111}。

2. 四方晶系

①对称特点　必定有且只有一个 L^4 或 L_i^4，包括 7 个晶类：复四方双锥晶类、复四方单锥晶类、四方双锥晶类、四方偏方面体晶类、四方单锥晶类、复四方偏三角面体晶类、四方四面体晶类。

②晶体定向　理想发育的四方晶系晶体，沿 L^4（或 L_i^4）方向往往发育较长或较短，而与晶体中其他任何方向的性质均不相同。

我们就以 L^4 或 L_i^4 为 Z 轴，以垂直 L^4（或 L_i^4）并互相垂直的两个 L^2，或两个对称面法线或两个晶棱方向为 X 轴、Y 轴。因此，它们的轴角为：$\alpha=\beta=\gamma=90°$。

在 $L^4 4L^2$、$L^2 4L^2 5PC$、$L_i^4 2L^2 2P$ 中，以 L^4（或 L_i^4）作为 Z 轴，以 $2L^2$ 作为 X 轴、Y 轴。

在 $L^4 4P$ 中，以 L^4 为 Z 轴，两个对称面法线为 X 轴、Y 轴。

在 L^4、L_i^4、L^4PC 中，以 L^4（或 L_i^4）为 Z 轴，以两条互相垂直的晶棱为 X 轴、Y 轴。

显然，Z 轴既然为 L^4（或 L_i^4），那么，由于 L^4 的作用，X 轴和 Y 轴相互间必定可以对称重复，因此，在 X、Y 轴两行列上的结点间距应当相等，而与 Z 轴则不同，所以 $a=b\neq c$，轴率是 $a:c$（因 $a=b$，故轴率只用 $a:c$ 来表示）。$a:c$ 的值随晶体之不同而异，需要进行实际计算方能得出。例如，黄铜矿晶体的轴率 $a:c=1:1.97050$，锡石晶体轴率 $a:c=1:0.67232$。

单位面的选择：根据四方晶系晶体常数特征，单位面的选择是与三晶轴相交而且与两水平轴截距相等的晶面可作为单位面。

③单形符号　四方晶系的单形及其单形定向、单形符号见图 1.5.28。

④举例　锆英石 $ZrSiO_4$（图 1.5.22），对称型为 $L^4 4L^2 5PC$，以 L^4 为 Z 轴，以垂直 L^4 而又互相垂直的两个 L^2 为 X 轴、Y 轴。晶体常数特征 $\alpha=\beta=\gamma=90°$，轴率 $a:c=1:0.9054$，单形及单形符号，四方双锥{111}，四方柱 m{110}。

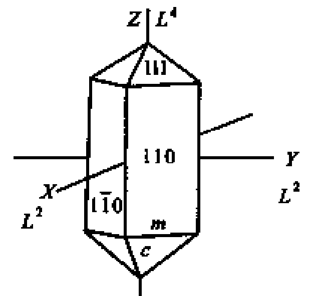


图 1.5.22　锆英石

3. 三方晶系与六方晶系

①对称特点　晶体中唯一的高次轴分别为 L^3 和 L^6（或 L_i^6）。

三方晶系共包括 5 个晶类：复三方偏三角面体晶类、三方偏方面体晶类、复三方单锥、菱面体晶类、三方单锥晶类。

六方晶系包括 7 个晶类：复六方双锥晶类、六方偏方面体晶类、复六方单锥晶类、六方双锥晶类、六方单锥晶类、复三方双锥晶类、三方双锥晶类。

②晶体定向　对于三方、六方晶系，为了更好地适应它们的对称特点，则往往选择 4 个晶轴，因为若选取 3 个晶轴，则同一单形上的各个晶面其晶面指数有很大的不同，难以识别和区

分，利用 4 个晶轴，可给晶体定向和确定晶面符号上带来方便，可以使同属于一个单形的晶面，取得相同的指数。

理想发育的三方、六方晶系晶体中，沿 L^3 和 L^6（或 L_i^6）方向往往发育较长或较短，而与晶体中其他任何方向的性质均不相同。

因此，以 L^3 和 L^6（或 L_i^6）为 Z 轴，在垂直 Z 轴的平面内，选择 3 个正端交角互成 120°的 L^2 或对称面法线或平行晶棱方向为 X 轴、Y 轴、U 轴。因此，它们的轴角关系为 $\alpha=\beta=90°,\gamma=120°$。

选择 3 个水平晶轴时，一般情况是优先考虑 L^2，然后依次再考虑对称面之法线和晶棱方向，但六方晶系中 $L_i^6 3L^2 3P$ 对称型是个例外，它不是选择 $3L^2$ 而是用 3 个包含 L_i^6 的对称面 P 的法线作为 X、Y、Z 轴。

由于 L^3 和 L^6 的作用，X、Y、U 三晶轴之间必定可以对称重复，因此，在 3 个水平轴 3 行列上的结点间距应当相等，但与 Z 轴则无对称联系，所以它们轴单位 $a=b\neq c$，轴率关系是 $a:c$（或 $b:c$）。轴率 $a:c$ 的具体值随晶体种类的不同而异，是晶体的特征性常数，需要进行实际计算方能得出，例如三方晶系的 α-石英 $a:c=1:1.10009$，六方晶系的磷灰石 $a:c=1:0.734603$。

单位面的选择：在四轴方向的情况下，同时与 4 个晶轴相截而各个标轴系数完全相同的晶面是不存在的。因此，单位面的选择有两种方法：

a)所选单位面只能是与 Z 轴及某两个水平轴（X、U 轴或 X、Y 轴）相截相同的标轴系数，与另一水平轴平行（图中是与 Y 轴平行），此时单位面的晶面符号为$(10\bar{1}1)$。

b)所选单位面与 4 个晶轴相交与两条水平轴和 Z 轴截距系数相等，与另一个水平轴截距为其一半，则这种单位面的晶面符号为$(11\bar{2}1)$。

③单形符号　三方、六方晶系的单形及其单形定向、单形符号见图 1.5.29。

④举例　方解石 $CaCO_3$（图 1.5.23），三方晶系，对称型为 $L^3 3L^2 3PC$，以 L^3 为 Z 轴，$3L^2$ 为 X、Y、U 轴，轴率为 $a:c=1:0.8543$，单形及单形符号：菱面体 $r\{10\bar{1}1\}$。

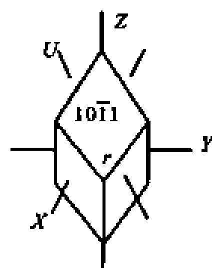


图 1.5.23　方解石

4. 斜方晶系

①对称特点　无高次轴，L^2 和 P 的总数不少于 3 个，包括 3 个晶类：斜方双锥晶类、斜方单锥晶类、斜方四面体晶类。

②晶体定向　以相互垂直的 $3L^2$ 为 X、Y、Z 轴，对于 $L^2 2P$ 对称型，以 L^2 为 Z 轴，两个 P 的法线为 X、Y 轴。因此，它们的轴角关系为：$\alpha=\beta=\gamma=90°$。

在斜方晶系中作为 3 个晶轴之间没有对称联系，不能因任何对称要素的作用而使之重复，故三者的性质均不相同。因此，在这 3 个晶轴上的结点间距互不相等，即 $a\neq b\neq c$，轴率 $a:b:c$ 的具体值随晶体种类的不同而异，是晶体的特征性常数，例如，橄榄石 $a:b:c=0.46575:1:0.58651$，文石 $a:b:c=0.62244:1:0.72056$。

因此，需要测算的晶体常数有两个，即 $a:b$ 和 $b:c$。

单位面的选择：任何与三轴相交的晶面皆可选作单位面，单位面的晶面符号为(111)，但这并不意味着此单位面在三晶轴上的截距相等。

③单形符号　斜方晶系的单形及其单形定向、单形符号见图 1.5.30。

④举例　泻利盐 $MgSO_4\cdot 7H_2O$（图 1.5.24），对称型为 $3L^2$，以 3 个相互垂直的 L^2 为 X、

Y、Z 轴，轴率 $a:b:c=0.989:1:0.572$，单形及单形符号：斜方四面体 $z\{111\}$，斜方柱 $m\{110\}$。

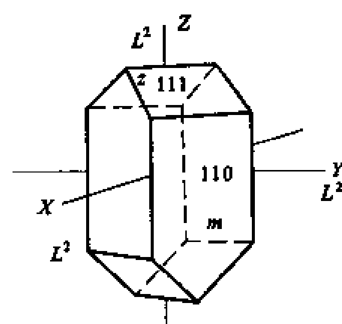


图 1.5.24 泻利盐

5. 单斜晶系

①对称特点　无高次轴，L^2 和 P 不多于一个。而且当既有 L^2 又有 P 时，P 的法线与 L^2 正好平行，包括斜方柱晶类、平行双面晶类、轴双面晶类 3 个晶类。

②晶体定向　以 L^2 或 P 的法线为 Y 轴，以垂直 Y 轴的二晶棱方向为 X、Z 轴。X 轴与 Z 轴相互间不可能正交，但应比较接近于 90°。三晶轴的安置是：Y 轴左右水平，Z 轴上、下直立，X 轴前后，但朝前下方倾斜，使 $\beta>90°$，即 X 轴与 Z 轴斜交，单斜晶系晶体因有一个晶轴（X 轴）是斜的，故称单斜晶系，因此，它们的轴角关系是：$\alpha=\gamma=90°$，$\beta\neq 90°$。

三晶轴之间没有对称联系，它们的性质不可能相同，不能借助于对称要素而彼此重复，所以轴单位 $a\neq b\neq c$。

在此晶系中，不同的晶体除 $a:b:c$ 的值各不相同之外，它们的 β 角也都是不同的，因此，需要测得的晶体常数就有 3 个：$a:b$ 和 $b:c$ 以及 β。

例如：正长石 $a:b:c=0.65851:1:0.55538$

$\beta=116°03'14''$

透辉石 $a:b:c=1.09213:1:0.58932$

$\beta=105°49'51''$

单位面的选择：与三晶轴相交的晶面可选为单位面。

③单形符号　单斜晶系的单形及其单形定向、单形符号见图1.5.31。

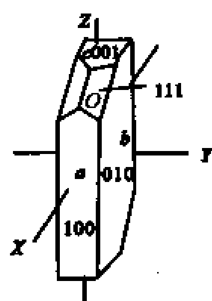


图 1.5.25 透辉石

④实例　透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$（图 1.5.25），对称型为 L^2PC，以 L^2 为 Y 轴，两个垂直 Y 轴的晶棱或可能晶棱方向为 X 轴和 Z 轴。轴率 $a:b:c=1.092:1:0.589$，$\beta=105°49'51''$。单形及单形符号：斜方柱 $O\{111\}$；板面 $c\{001\}$、$b\{010\}$、$a\{100\}$。

6. 三斜晶系

①对称特点　无对称面和对称轴，只有对称中心 C 和 L^1，包括两个晶类：平行双面晶类、单面晶类。

单面晶类从晶体外形来看不对称，但它内部具有格子构造，从这种意义来说，本类晶体还是具有对称性的。

②晶体定向　在三斜晶系中，没有对称要素可供选择作为晶轴的，定向时，只有选不在一个平面上，相互间且近于垂直的 3 个晶棱的方向为 X、Y、Z 轴。

晶轴的安置是：Z 轴上下直立，Y 轴左右方向并朝右下方倾斜，X 轴大致位于前后方向，并使它朝前下方倾斜，即应使 $\alpha>90°$、$\beta>90°$，γ 则随具体情况而定，可为钝角，也可为锐角，在这里 3 个轴角全都不呈直角。三晶轴皆斜交故称三斜晶系。因此它们的轴角关系是：

$$\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90° \qquad \alpha>90° \qquad \beta>90°$$

显然，它们三晶轴之间也没有对称联系，性质也不相同，不能借助于对称要素的作用而彼此重复，所以，轴单位 $a\neq b\neq c$。

在此晶系中，所有的 3 个轴角以及轴率的具体值均随晶体种类的不同而异，它们全都是晶体的特征性常数，因此，需要测算的晶体常数有 5 个：$a:b$、$b:c$ 及 α、β、γ。

例如，钠长石 $a:b:c=0.63347:1:0.55771$，$\alpha=94°03'$，$\beta=116°28\frac{5}{6}'$，$\gamma=88°08\frac{2}{3}'$。

③单形符号　三斜晶系的单形及其单形定向、单形符号见图 1.5.32。

从图中可以看出，单面仅见于单面晶类(L^1)，平行双面仅见于平行双面晶类(c)，它们均具有 7 种不同的符号，反映其晶面轴之间的关系各不相同。

④举例　钠长石 Na[$AlSi_3O_8$](图 1.5.26)，对称型 c，选三条相交近于 90°的晶棱方向作为晶轴(见图)。轴率、轴角见前例，单形及单形符号：平行双面 $c\{001\}$、$m\{110\}$、$b\{010\}$、$o\{10\bar{1}\}$、$p\{1\bar{1}\bar{1}\}$。

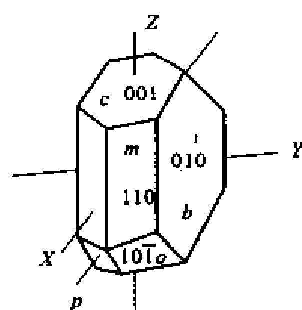


图 1.5.26　钠长石

四面体{111}

三角三四面体{hkk}
{211}

四角三四面体{hhl}
{221}

五角三四面体{hkl}
{321}

大四面体{hkl}
{321}

八面体
{111}

四角三八面体{hkk}
{211}

三角三八面体{hhl}
{221}

五角三八面体{hkl}
{321}

大八面体{hkl}
{321}

立方体{100}

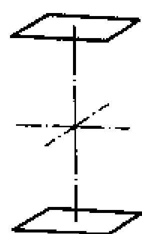
四六面体{hko}
{210}

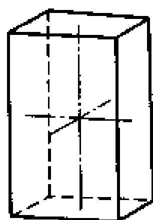
菱形十二面体{110}

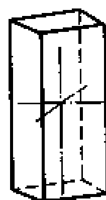
五角十二面体{hko}
{210}

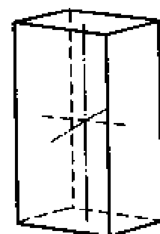
偏方复十二面体{hkl}
{321}

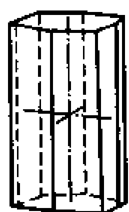
图 1.5.27　等轴晶系单形定向及单形符号

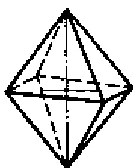

平行双面{001}

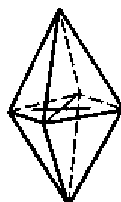

四方柱{100}

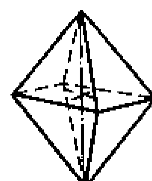

四方柱{110}

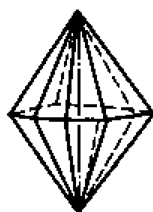

四方柱{hko}

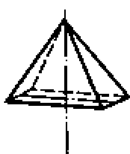

复四方柱{hko}

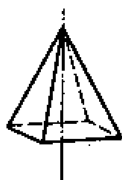

四方双锥{hol}
{101}

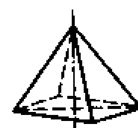

四方双锥{hhl}
{111}

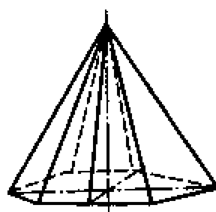

四方双锥{hkl}

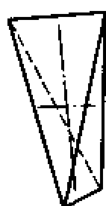

复四方双锥{hkl}

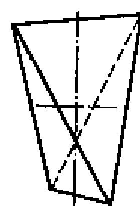

四方单锥{hol}
{101}

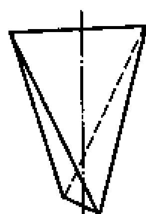

四方单锥{hhl}
{111}

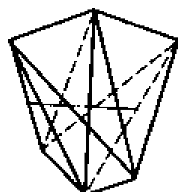

四方单锥{hkl}


复四方单锥{hkl}


四方四面体{hol}


四方四面体{hhl}


四方四面体{hkl}


四方偏三角面体{hkl}

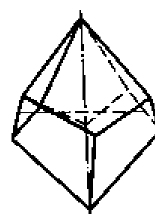
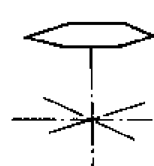
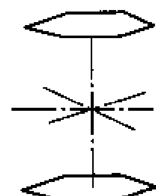

四方偏方面体{hkl}

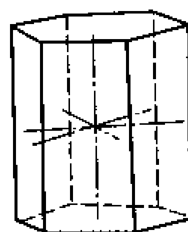
图 1.5.28 四方晶系单形定向及单形符号



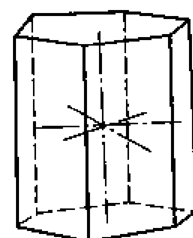
单面{0001}



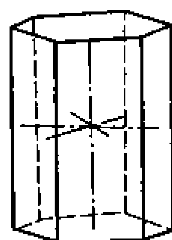
平行双面{0001}



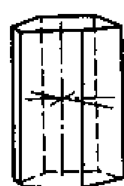
六方柱{10$\bar{1}$0}



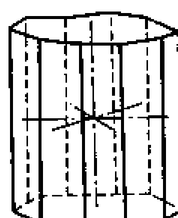
六方柱{11$\bar{2}$0}



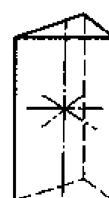
六方柱{$hk\bar{i}o$}



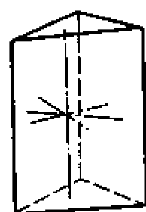
复三方柱{$hk\bar{i}o$}
{21$\bar{3}$0}



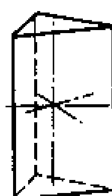
复六方柱{$hk\bar{i}o$}
{21$\bar{3}$0}



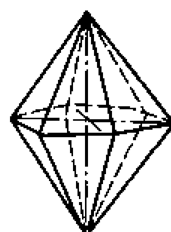
六方双锥{10$\bar{1}$0}



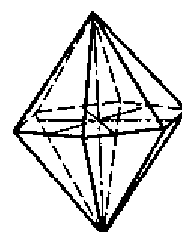
三方柱{11$\bar{2}$0}



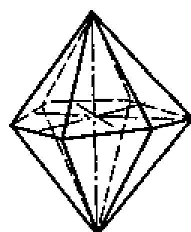
三方柱{$hkio$}
{21$\bar{3}$0}



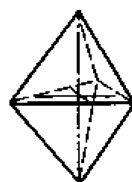
六方双锥{$ho\bar{h}l$}
{10$\bar{1}$1}



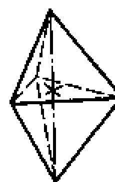
六方双锥{$hh\bar{2}h$}
{11$\bar{2}$2}



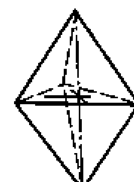
六方双锥{$hkil$}
{21$\bar{3}$3}



三方双锥{$ho\bar{h}l$}
{10$\bar{1}$1}

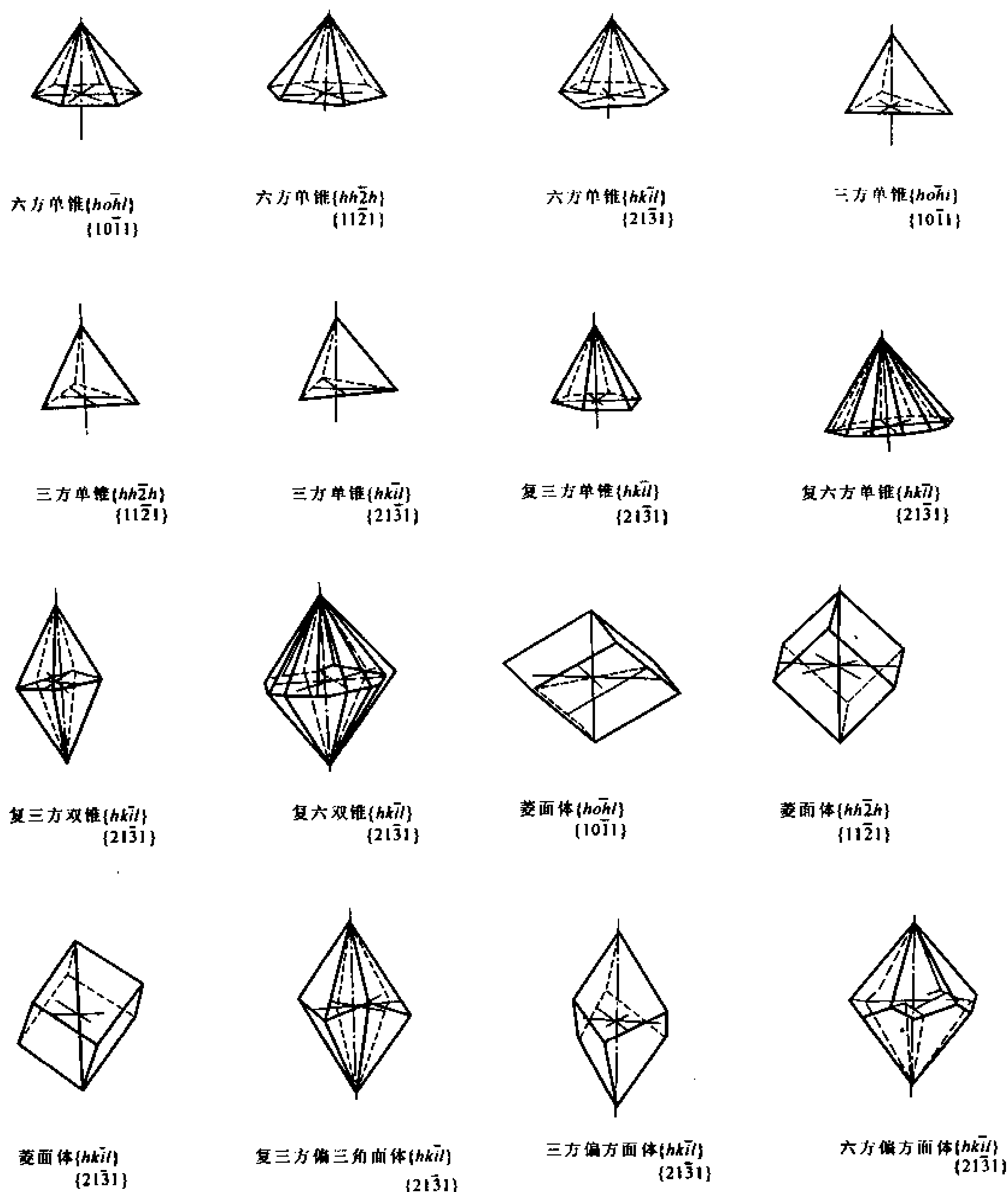


三方双锥{$hh\bar{2}h$}
{11$\bar{2}$1}

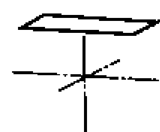


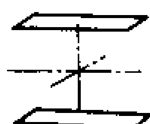
三方双锥{$hk\bar{i}l$}
{21$\bar{3}$1}

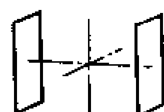
图 1.5.29 三方及六方晶系单形定向及单形符号

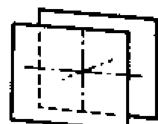


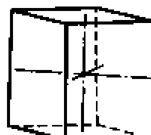
续图 1.5.29　三方及六方晶系单形定向及单形符号

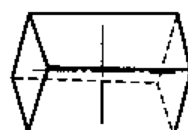

单面{001}

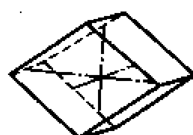

平行双面{001}

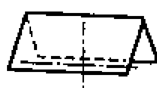

平行双面{010}


平行双面{100}

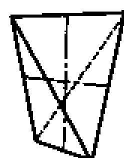

斜方柱{*hko*}
{110}


斜方柱{*hol*}
{101}


斜方柱{*okl*}
{011}


双面{*hol*}
{101}


双面{*okl*}
{011}


斜方四面体{*hkl*}
{111}


斜方单锥{*hkl*}
{111}

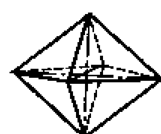
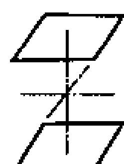
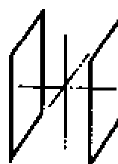
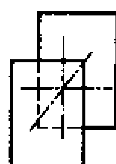
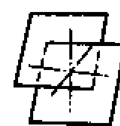

斜方双锥{*hkl*}
{111}

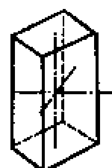
图 1.5.30 斜方晶系单形定向及单形符号

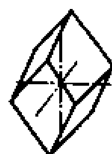

平行双面{001}

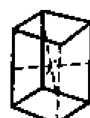

平行双面{010}


平行双面{100}


平行双面{*hol*}
{101}


斜方柱{*hko*}
{110}


斜方柱{*okl*}
{011}


斜方柱{*hkl*}
{111}

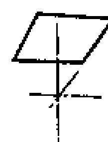
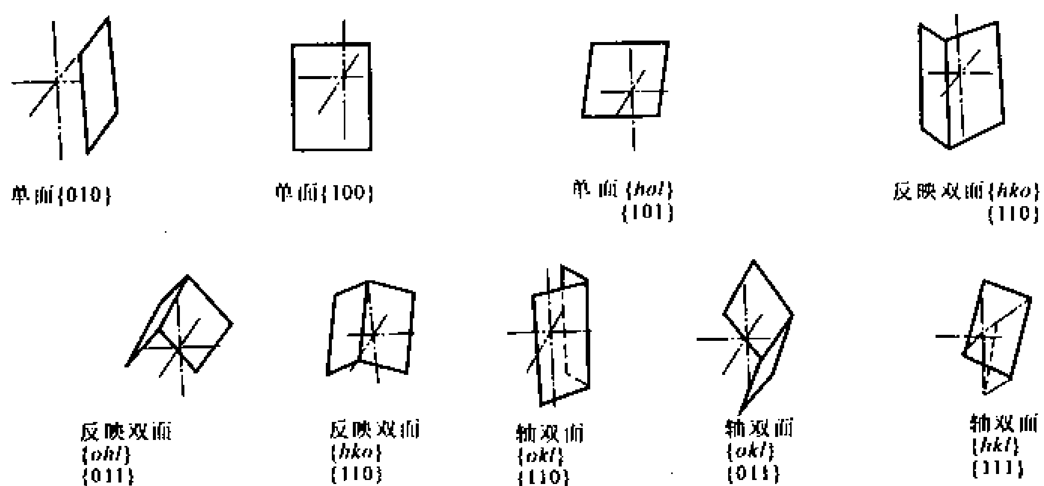

单面{001}

图 1.5.31 单斜晶系的单形定向及单形符号



续图 1.5.31　单斜晶系的单形定向及单形符号

平行双面{001}　平行双面{010}　平行双面{100}

平行双面{hko}
{110}

平行双面{okl}
{011}

平行双面{hol}
{101}

平行双面{hkl}
{111}

单面{001}　单面{010}　单面{100}　单面{hko}

单面{okl}
{011}

单面{hol}
{101}

单面{hkl}
{111}

图 1.5.32　三斜晶系单形定向及单形符号

6 晶体的连生

以上各章讨论的对象都只是限于单晶体，但在自然界和实验室里所出现的经常是多晶体连生在一起的晶体，很少以单独形式存在。通常把两个或两个以上单晶体生长聚集在一起的现象称为晶体的连生。

晶体的连生又按照互相连生的晶体之间有无一定的规律可分为不规则连生和规则连生两大类。

不规则连生：是指晶体连生与晶体构造无任何规律性联系，连生的晶体相互处于任意位置而连生着，外形上彼此间也没有严格的规律，这种连生在自然界分布很广，无论是同种晶体或异种晶体均常出现。如自然界常见的石英晶簇，每个石英晶体的个体无规律地连生着，又如组成花岗岩、玄武岩等各种不同矿物小晶体之间的绝大多数是不规则连生。

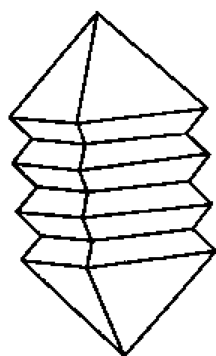
规则连生：是指晶体连生的单个晶体之间依晶体构造某些特点有规律地连生在一起，表现在外形上晶体个体间有规律地连接着。

规则连生又可按连生晶体种类的异同而分为：同种晶体的规则连生，指连生着的晶体相同，包括平行连生和双晶；异种晶体的规则连生，指连生着的晶体不同或同种晶体以不同单形晶面接合的规则连生，包括浮生或定向附生。

平行连生、双晶是本章讨论的内容，重点是双晶。

6.1 平行连生

两个或两个以上的同种晶体，彼此平行地连生在一起，连生着的每一个晶体的相对应的晶面和晶棱都相互平行，这种连生称为平行连生。图 1.6.1 和图 1.6.2 分别表示了明矾八面体晶体和萤石立方体晶体的平行连生，其特点是：晶体内部格子构造对应的面网、行列是平行连续的，在晶体外形上，所有的对应晶面、晶棱均相互平行。



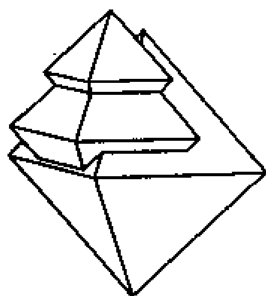


图 1.6.1 明矾八面体晶体的平行连生

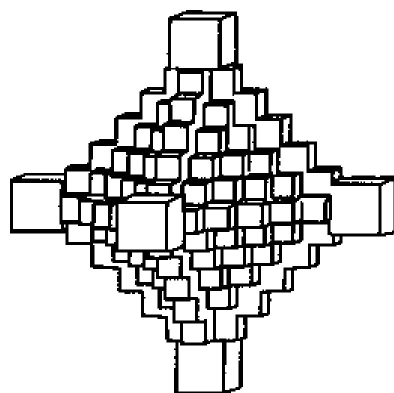


图 1.6.2 萤石立方体晶体的平行连生

某些树枝状晶体也是晶体平行连生的一种体现。图 1.6.3 为自然铜晶体的平行连生，它

由很多小的立方体晶体沿着角顶(即沿 L^3)或晶棱(即沿 L^2)的方向平行连生，从而形成树枝状晶体。这也说明了树枝状晶体系由于晶体沿棱角方向迅速生长所致。这一情况与骸晶的情况是一致的，事实上两者也很难作严格的区分。

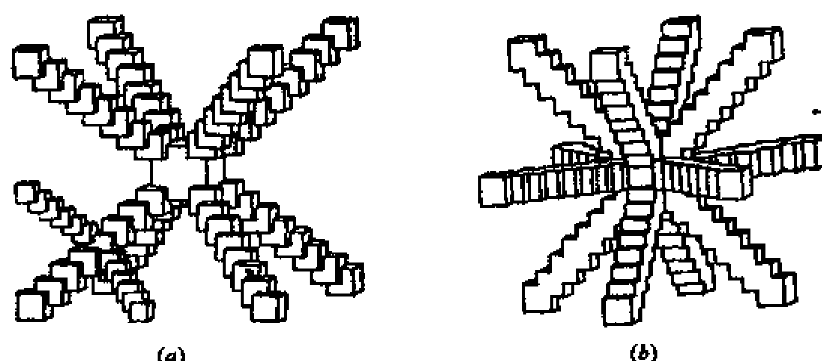


图 1.6.3 自然铜的立方体晶体的树枝状平行连生

(*a*) 沿立方体角顶(L^3)延伸；(*b*)沿立方体晶棱(L^2)延伸

平行连生从外形来看是多晶体的连生，但它们的内部格子构造都是平行而连续的，从这点来看它与单晶没有什么差异。

6.2 双　　晶

1. 双晶的概念

双晶是两个以上的同种晶体按一定的对称规律形成的规则连生，相邻两个个体的相应的面、棱、角并非完全平行，但它们可借助对称操作——反映、旋转或反伸，使两个个体彼此重合或平行。

2. 双晶要素

设想使双晶的相邻的两个个体重合、平行而进行操作时所凭借的辅助几何图形(面、线、点)称为双晶要素。

①双晶面：双晶面为一假想的平面，通过它的反映，可使双晶相邻的两个个体重合或平行。图 1.6.4 石膏双晶的两个个体通过平行(100)的平面(图中带阴影的面)的反映，可以彼此重合；图 1.6.5 尖晶石双晶的两个个体通过平行(111)的平面(图中带阴影的面)的反映可以重合。

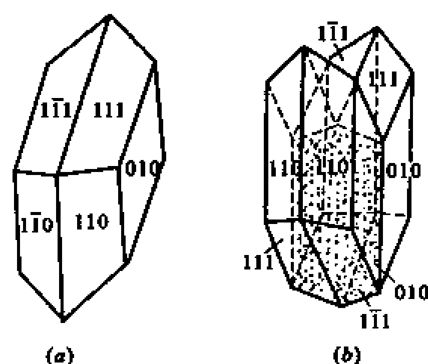


图 1.6.4 石膏的单晶(*a*)及双晶(*b*)

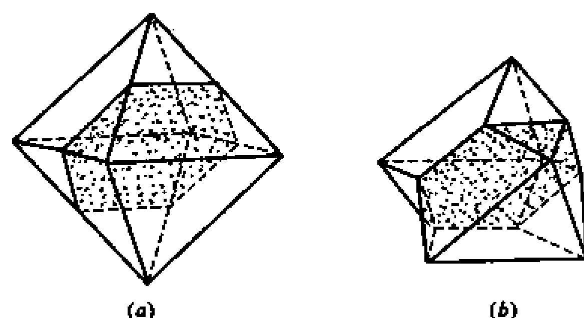


图 1.6.5 尖晶石的单晶(*a*)及双晶(*b*)

(带阴影的面为双晶面)

双晶面一般平行于晶体上实际晶面或可能晶面，或者垂直于实际晶棱或可能晶棱。因此，它可以用平行于某种晶面（如石膏双晶面平行于(100)）或垂直于某种晶棱来表示。

双晶面不可能平行于单晶体中的对称面，否则就会使两个个体处于平行的位置，而成为平行连生。

②双晶轴：双晶轴为一假想的直线，假想双晶中的一个个体不动，另一个体围绕此直线旋转一定角度（一般是180°）后，可使两个个体重合、平行或连成一个完整的单晶体。图1.6.4石膏双晶的一个个体围绕垂直(100)的直线旋转180°，或图1.6.5尖晶石双晶的一个个体围绕垂直(111)的直线旋转180°都可形成为单晶体；图1.6.6正长石双晶的一个个体围绕Z轴旋转180°后可与另一个体平行；图1.6.7萤石双晶的一个（立方体）个体围绕垂直(111)的直线旋转180°后可与另一个立方体个体重合。

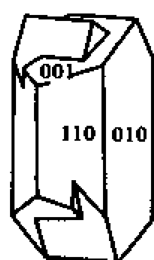


图1.6.6　正长石的卡斯巴双晶

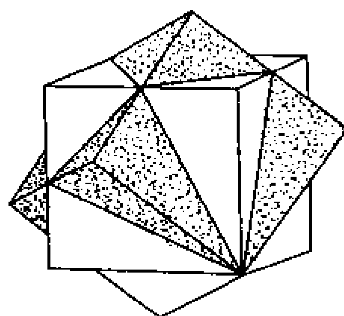


图1.6.7　萤石的双晶

双晶轴平行于晶体的实际晶棱或可能晶棱，或者垂直于实际晶面或可能晶面。因此，双晶轴可用晶棱符号或以垂直某一晶面的形式表示。如石膏的双晶轴垂直(100)，正长石的卡斯巴双晶的双晶轴平行Z轴等。

显然，基转角为180°的双晶轴不能平行单晶体的偶次轴，否则也将会形成"平行连生"。

③双晶中心：双晶中心为假想的点，双晶的一个个体通过它的反伸可与另一个体重合。双晶中心只有在没有对称中心的晶体中出现，否则也即是平行连生。双晶中心只在单晶个体没有偶次轴或对称面的情况下才有独立意义。故一般双晶的描述中也极少应用它。

如果构成双晶的单晶体具有对称中心时，则双晶轴和双晶面将同时存在，并互相垂直；如果单晶体不具对称中心，则双晶轴或双晶面常单独存在，即使有时两者同时出现，但必定互不垂直。

有时，一种双晶可以同时具有若干个双晶轴或双晶面，但一般描述时只采取其中的某一种。如图1.6.7的萤石双晶，有4个双晶面和4个双晶轴，但习惯上仅以双晶面平行(111)、双晶轴垂直(111)来表示。

在双晶的描述中除应用上述双晶要素外，有时还要提到结合面，它是双晶相邻个体间相接触的面，是属于两个个体的共用面网。它同样用平行它的晶面的符号来表示。结合面可与双晶面重合，如在石膏的双晶（图1.6.4）中两者皆平行(100)，也可以不重合，如正长石的卡斯巴双晶（图1.6.6），双晶面平行(100)，结合面平行(010)。

双晶结合的规律称双晶律。双晶律可用双晶要素、接合面等表示。有时双晶律也被赋予各种特殊的名称，有的以该双晶的特征矿物命名，如尖晶石律、云母律、钠长石律等等；有的以该双晶初次被发现的地点命名，如长石双晶的卡斯巴律、曼尼巴律、巴温诺律，石英双晶的道芬律、巴

西律等；有的以双晶形态命名，如石膏的燕尾双晶、锡石的膝状双晶、方解石的蝴蝶双晶等；有的以双晶面或结合面命名，如正长石的底面双晶（以(001)为双晶面及结合面）、方解石的负菱面双晶（双晶面及结合面平行$(01\bar{1}2)$负菱面体晶面）等。此外，还有根据双晶轴与结合面的关系来划分双晶律的，当双晶轴垂直于结合面时，称面律双晶；当双晶轴平行结合面，同时还平行于某一晶轴时，称轴律（棱律）双晶；双晶轴平行结合面，同时垂直于某一晶轴时，称混合律双晶。

3. 双晶的类型

根据双晶个体连生的方式，可将双晶分为两种类型。

①接触双晶：双晶个体以简单的平面相接触而连生者称接触双晶。它又可分为：

a)简单的接触双晶　由两个个体组成，如图 1.6.4 石膏的双晶，图 1.6.5 尖晶石的双晶。

b)聚片双晶　多个片状个体以同一双晶律连生，结合面相互平行。聚片双晶常可在某些晶面或解理面上显示聚片双晶纹，如钠长石的聚片双晶（图 1.6.8），它的结合面平行(010)。

c)环状双晶　多个双晶个体彼此以同样的双晶律连生，但结合面互不平行，而是依次以等角相交。根据双晶连生个体的数目有三连晶、四连晶等名称，如锡石的环状双晶（图 1.6.9），它的双晶面平行于(101)。

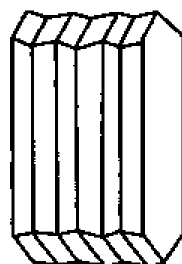


图 1.6.8　钠长石的聚片双晶

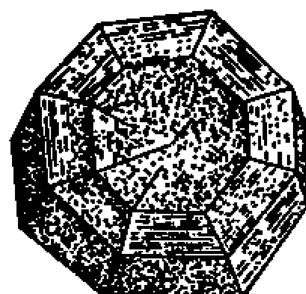


图 1.6.9　锡石的环状双晶

②穿插双晶（贯穿双晶）：穿插双晶是由个体相互穿插而形成的双晶。如图 1.6.7 萤石的穿插双晶。穿插双晶也可以由多个个体组成，如文石的三连晶（图 1.6.10），它们的双晶面平行(110)。

以上是常见的双晶类型，它们的个体间都是以相同的双晶律结合的。还有一些复杂的双晶，它们由两个以上的个体组成，彼此间以不同的双晶律相连生。如图 1.6.11 为十字石的一种复杂双晶，个体 A、B 之间以(031)为双晶面穿插，而第 3 个个体 C 与 A、B 之间皆以(231)为双晶面相互穿插。

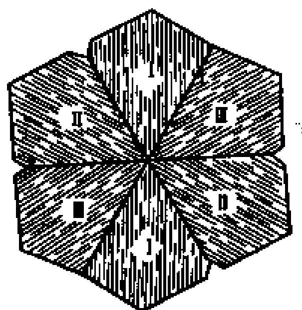


图 1.6.10　文石的三连晶

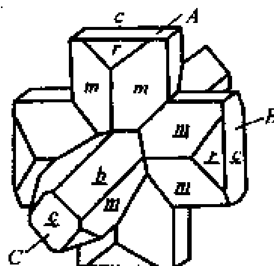


图 1.6.11　十字石按两种双晶律形成的穿插双晶

$m\{110\}$、$r\{101\}$、$c\{001\}$、$b\{010\}$

7 晶体结构的几何理论

前面我们已讨论了晶体的基本性质和晶体外形的一系列几何规律。晶体所以具有这些特征，根本原因在于它内部的格子构造。只有用格子构造的理论才能统一地解释它们，所以只有明晰晶体内部构造的规律，才能反映出晶体规律性的全貌。

晶体构造的几何理论完成于19世纪末，20世纪初为X射线分析所证实。在此章要说明的是晶体外形属于宏观范畴，是一有限图形，它是晶体内部微观结构存在的一种外在表现形式，而晶体的内部结构则属于微观范畴，可以看成是一种无限图形(因其离子间距离极其微小)，也是晶体外形得以存在的内在实质，它是相互依存并且统一的。晶体结构内部的质点相互间存在一定的几何关系。

7.1 十四种空间格子

1. 平行六面体的选择

从第1章的有关论述中，我们已知：晶体构造最基本的特征是质点在三维空间的周期重复，空间格子是表示这种重复规律的几何图形，而平行六面体是空间格子中的最小重复单位。整个晶体结构可视为这种平行六面体在三维空间平行的、毫无间隙的重复堆砌而成。

对于每一种晶体结构而言，其结点(相当点)的分布是客观存在的，但平行六面体的选择是人为的。如图1.7.1所示，同一种格子构造，其平行六面体的选择可有多种方法。因此，选择平行六面体必须遵循一定的原则才能统一。

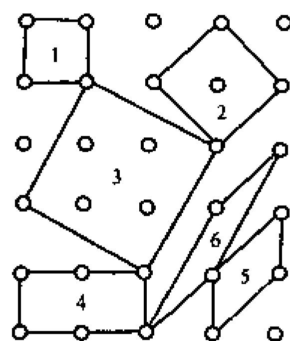


图1.7.1 平行六面体的选择

在结晶学中，平行六面体的选择原则如下：

①所选取的平行六面体应能反映结点分布整体所固有的对称性；

②在上述前提下，所选取的平行六面体中棱与棱之间的直角关系力求最多；

③在满足以上二条件的基础上，所选取的平行六面体的体积力求最小。

上述条件实质上与前面所讲的晶体定向的原则，即尽量使 $a=b=c$、$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 是一致的。

根据以上原则，分析图1.7.1所示的情况，显然按第1种方法来选取平行六面体才符合上述原则。在实际晶体结构中，这种被选取的重复单位(平行六面体)称之为晶胞。

2. 各晶系平行六面体的形状和大小

平行六面体的形状和大小用它的三根棱长(轴长)a、b、c 及棱间的夹角(轴角)α、β、γ 表征(图1.7.2)。这组参数(a、b、c；α、β、γ)即为晶胞参数。各晶系平行六面体形状不同(图1.7.3)、对称性不同，因而晶胞参数各异。现将7个晶系的晶胞参数列下：

等轴晶系：$a=b=c$；$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$；

四方晶系：$a=b\neq c$；$\alpha=\beta=\gamma=90°$；

六方晶系及三方晶系：$a=b\neq c$；$\alpha=\beta=90°$，$\gamma=120°$；

三方晶系：$a=b=c$；$\alpha=\beta=\gamma\neq 90°, 60°, 109°28'16''$；

斜方晶系：$a\neq b\neq c$；$\alpha=\beta=\gamma=90°$；

单斜晶系：$a\neq b\neq c$；$\alpha=\gamma=90°$，$\beta\neq 90°$；

三斜晶系：$a\neq b\neq c$；$\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90°$。

3. 平行六面体中结点的分布

在按选择原则选择出的平行六面体中，结点（相当点）的分布只能有四种可能的情况，与其对应可分为四种格子类型（图1.7.4）。

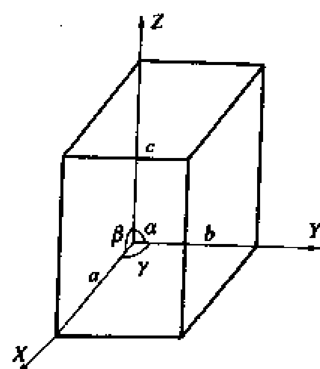


图 1.7.2 决定平行六面体形状和大小的参数

①原始格子（P）：结点分布于平行六面体的8个角顶上。

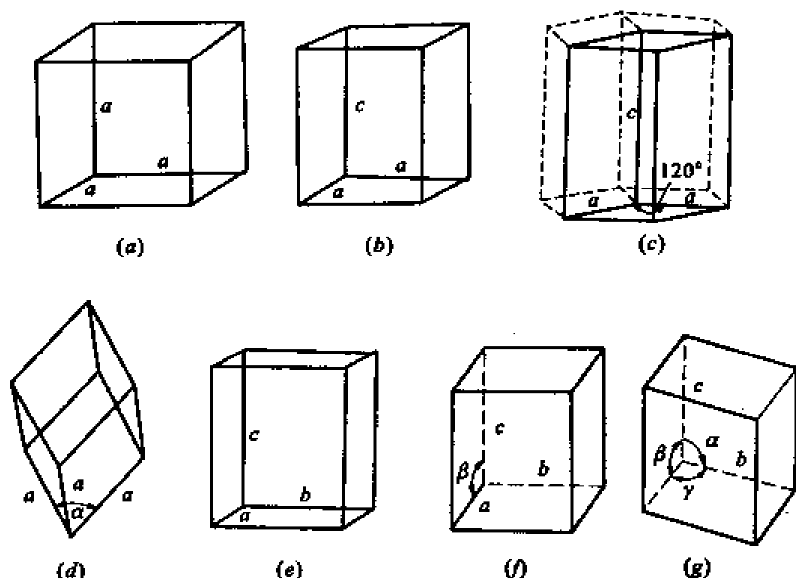


图 1.7.3 各晶系平行六面体的形状

(a) 立方格子；(b) 四方格子；(c) 六方格子；(d) 三方菱面体格子；(e) 斜方格子；(f) 单斜格子；(g) 三斜格子

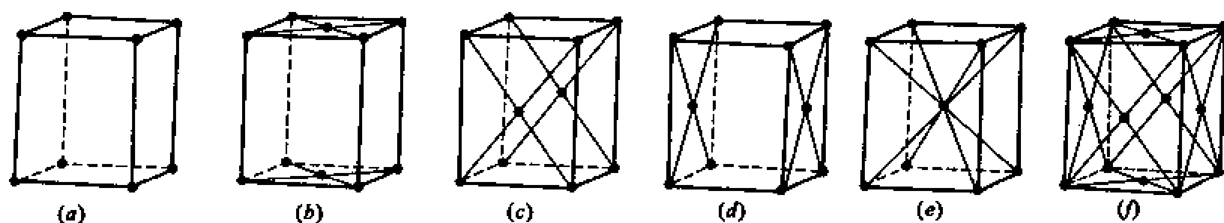


图 1.7.4 四种格子类型

(a) 原始格子；(b)、(c)、(d) 底心格子；(b)C 心格子；(c) A 心格子；(d) B 心格子；(e) 体心格子；(f) 面心格子

②底心格子：结点分布于平行六面体的角顶及某一对面的中心。其中又可细分为：

a)C 心格子（C） 结点分布于平行六面体的角顶和平行(001)一对面的中心。

b)A 心格子（A） 结点分布于平行六面体的角顶和平行(100)一对面的中心。

c)B 心格子（B） 结点分布于平行六面体的角顶和平行(010)一对面的中心。

一般情况下所谓底心格子即意为 C 心格子。对 A 心或 B 心格子，能转换成 C 心格子时，

应尽可能地予以转换。当然，有时因特殊需要，可选用 A 心、B 心格子而无须转换。

③体心格子(I)：结点分布于平行六面体的角顶和体中心。

④面心格子(F)：结点分布于平行六面体的角顶和三对面的中心。

4. 十四种布拉维格子

综合考虑平行六面体的形状及结点的分布情况，在晶体结构中只可能出现 14 种不同型式的空间格子。这是由布拉维(A. Braviais)于 1848 年最先推导出来的，故称为十四种布拉维格子。它们如表 1.7.1 中所列。

表 1.7.1　十四种布拉维格子

	原始格子(P)	底心格子(C)	体心格子(I)	面心格子(F)
三斜晶系		$C=P$	$I=P$	$F=P$
单斜晶系			$I=C$	$F=C$
斜方晶系				
四方晶系		$C=P$		$F=I$
三方晶系	R	与本晶系对称不符	$I=R$	$F=R$
六方晶系		不符合六方对称	与空间格子的条件不符	与空间格子的条件不符
等轴晶系		与本晶系对称不符		

既然平行六面体有前述的七种形状和四种结点分布类型，为什么不是 7×4=28 种空间格子而只有 14 种呢？这是因为某些类型的格子彼此重复并可转换，还有一些不符合某晶系的对称特点而不能在该晶系中存在。现举几例略加说明。

如图 1.7.5、图 1.7.6、图 1.7.7、图 1.7.8 所示，三斜面心格子可转变成体积更小的三斜原始格子（图 1.7.5）；单斜 B 心格子可转变成体积更小的单斜原始格子（图 1.7.6）；四方底心格子可转变为体积更小的四方原始格子（图 1.7.7）；三方菱面体体心格子可转变成体积更小的三方菱面体原始格子（图 1.7.8）。

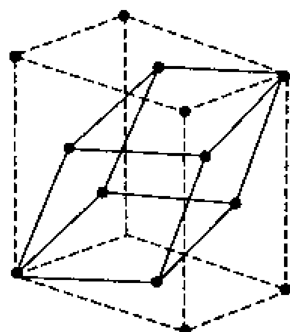


图 1.7.5　三斜面心格子（虚线）转变为三斜原始格子（实线）的图解

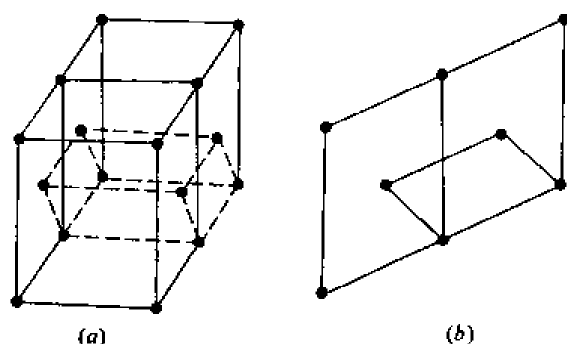


图 1.7.6　单斜 B 心格子（实线）转变为单斜原始格子（虚线）的图示
(a) 体视图；(b) (010)面投影图

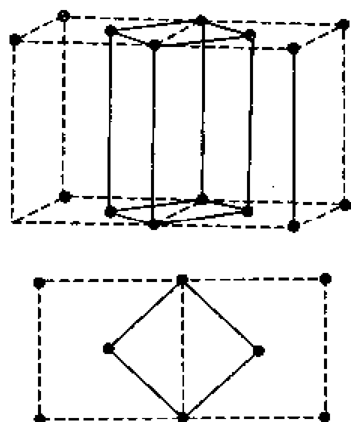


图 1.7.7　四方底心格子（虚线）转变为四方原始格子（实线）的图解

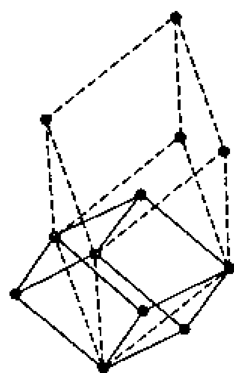


图 1.7.8　三方体心格子（虚线）转变为三方原始格子（实线）的图解

在等轴晶系中，若在立方格子中的一对面的中心安置结点，则完全不符合等轴晶系具 $4L^3$ 的对称特点，故不可能存在立方底心格子。

以上表明：当去掉一些重复的、不可能存在的空间格子后，在晶体结构中只可能出现 14 种空间格子，即 14 种布拉维格子。

7.2　晶体内部构造的对称要素——微观对称要素

空间格子只体现了晶体结构中相当点的重复方式，为了详尽地了解晶体构造中相同部分

的重复规律，还必须进一步探讨晶体内部构造的对称。

晶体外形的对称取决于晶体内部构造的对称，两者是相互联系、彼此统一的。但是，晶体外形是有限图形，它的对称是宏观的有限图形的对称；而我们在研究晶体内部构造规律的时候是把晶体构造作为无限图形来对待的，它的对称属于微观的无限图形的对称。因此这两者之间既是互相联系的又是互相区别的。晶体构造的对称就有与外形对称所不同的特点：

①在晶体构造中，任何对称要素都有无限多个相同的对称要素，作平行而有规律的排列，对称要素不相交于一点。

②在晶体构造中，除具有外形宏观对称上可能出现的那些对称要素之外(即对称面、对称轴、对称中心、反伸轴)，由于无限图形有一个新的动作——平移操作，因此还出现了一些新的、特有的对称要素——平移轴、滑移面、螺旋轴。

因此，晶体内部构造的对称要比晶体外形的对称要复杂得多。

晶体结构中可能出现的对称要素包括两部分：一部分是在晶体外形上也能出现的宏观对称要素，即第 4 章所叙述的对称中心、对称面、对称轴及反伸轴；另一部分只能在作为无限图形的晶体结构中才能出现的微观对称要素，它包括有平移轴、滑移面和螺旋轴，现把微观对称要素分别叙述如下：

1. 平移轴

平移轴为一直线，图形沿此直线移动一定距离，可使相等部分重合，相应的操作为平移操作。

空间格子中，任一行列都是平移轴，晶体的构造沿着空间格子中的任意一条行列移动一个或若干个结点间距时，整个晶格上的点可以与其完全相同的点相重合。

任何一个晶体构造中平移轴有无穷多，所以平移轴只能代表一个直线方向，它们不具有特殊意义，但空间格子可以视为平移操作相应的对称要素。

2. 螺旋轴

螺旋轴为晶体构造中一条假想直线，当构造围绕此直线旋转一定角度，并平移一定距离之后，构造中的每一质点都与其相同的质点重合，整个构造自相重合。相应的操作为旋转加平移操作(或者平移加旋转)。

螺旋轴也与对称轴情况一样根据基转角 α，可以分为二次($\alpha=180°$)、三次($\alpha=120°$)、四次($\alpha=90°$)和六次($\alpha=60°$)螺旋轴，但一次螺旋轴不是独立的对称要素，因为旋转 360°后将回复到起始位置，因而它总是直接等于平移轴，当然，它同时必定包含一个一次旋转轴在内。

每一种螺旋轴又可根据移距 t 与平行该轴的结点间距 T 的相对大小分为一种或几种。对称轴可以视为螺旋轴的移距 $t=0$ 者。

螺旋轴还可根据其旋转的方向有左旋(顺时针旋转)、右旋(逆时针旋转)和中性螺旋之分。

现将各种螺旋轴(包括对称轴和螺旋轴)分述如下：

①二次轴　二次轴有两种：图 1.7.9(a)、(b)，即二次对称轴(2)和二次螺旋轴(2_1)。2_1 这个符号可以理解为：2 为轴次，右下方加一角码 1，以轴次作分母，以角码作分子即为 1/2，表示其移距 $t=\frac{1}{2}T$。

②三次轴　三次轴有三种：图 1.7.10(a)、(b)、(c)，即三次对称轴(3)、右旋三次螺旋轴(3_1)和左旋三次螺旋轴(3_2)。其中 3_1 表示右旋(逆时针)时向上的移距 $t=\frac{1}{3}T$，3_2 表示顺时

针左旋时，向上的移距 $t=\frac{2}{3}T$（逆时针右旋时仍然为 $t=\frac{1}{3}T$）。

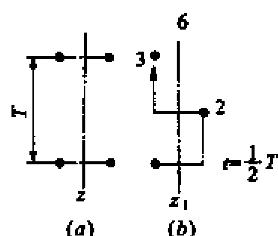


图 1.7.9

(a) 二次对称轴(2)；

(b) 二次螺旋轴(2_1)

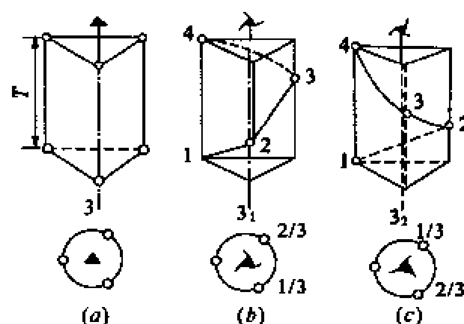


图 1.7.10

(a) 三次对称轴(3)；(b) 右旋三次螺旋轴(3_1)；

(c) 左旋三次螺旋轴(3_2)

③四次轴　四次轴有四种：图 1.7.11(a)、(b)、(c)、(d)，即四次对称轴(4)，右旋四次螺旋轴(4_1)，中性四次螺旋轴(4_2)和左旋四次螺旋轴(4_3)，后三者当逆时针旋转时向上的移距分别为 $T/4$、$2T/4$ 和 $3T/4$。其中 4_2 为双轨中性螺旋。

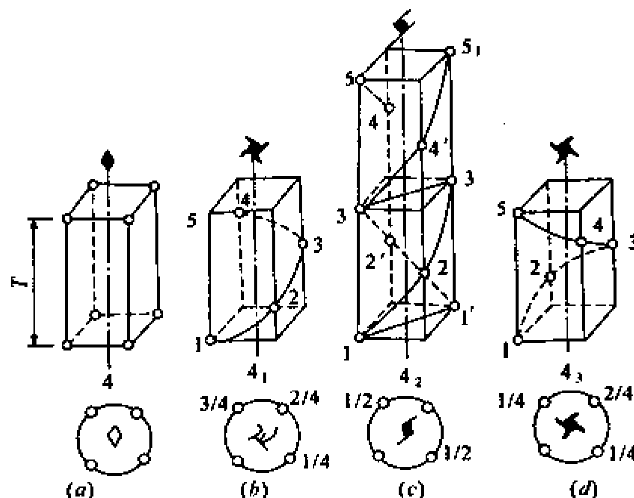


图 1.7.11

(a) 四次对称轴(4)；(b) 右旋四次螺旋轴(4_1)；(c) 中性四次螺旋轴(4_2)；(d) 左旋四次螺旋轴(4_3)

④ 六次轴　六次轴有六种：图 1.7.12(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)，即六次对称轴(6)、右旋六次螺旋轴(6_1、6_2)、中性六次螺旋轴(6_3)和左旋六次螺旋轴(6_4、6_5)。其中 6_2 和 6_4 为双轨螺旋，6_3 为三轨螺旋。

综合上述可知螺旋轴有 11 种，其中：

右旋螺旋轴有：3_1、4_1、6_1、6_2；

左旋螺旋轴有：3_2、4_3、6_5、6_4；

中性螺旋轴有：2_1、4_2、6_3。

必须说明：对于螺旋轴当移距 $t=0$ 时，螺旋轴即脱化为同轴次的对称轴，所以晶体外形的对称轴，在晶体结构中可以是对称轴，也可以是同种轴次的螺旋对称轴。晶体结构中的一组平行的螺旋对称轴在外形上的反映则为一根对称轴。

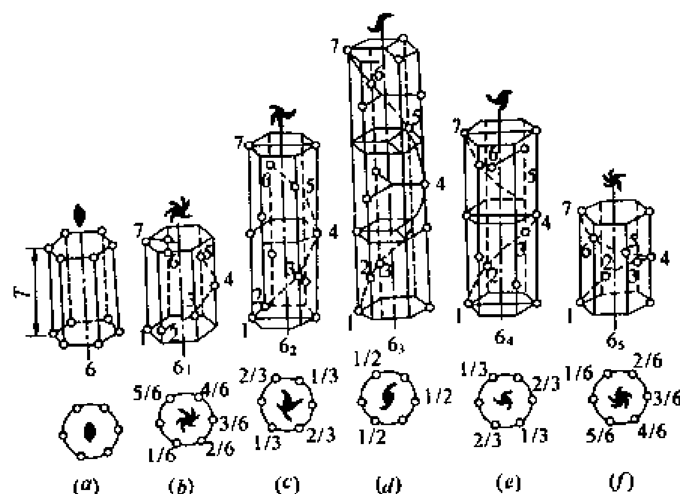


图 1.7.12

(a) 六次对称轴(6);(b)、(c) 右旋六次螺旋轴(6_1、6_2);(d) 中性六次螺旋轴(6_3);(e)、(f) 左旋六次螺旋轴(6_4、6_5)

3. 滑移面(象移面)

滑移面是晶体构造中一个假想的平面,当构造对此平面反映,并平行此平面移动一定距离后,构造中的每一质点皆与其相同的质点重合,整个构造自相重合。相当的操作为反映和平移操作(或者平移加反映)。

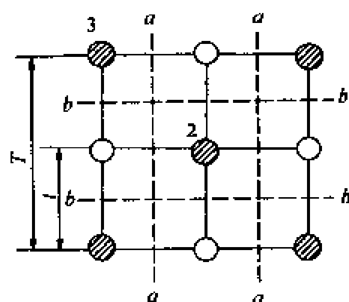


图 1.7.13 石盐构造中的滑移对称面

如图 1.7.13 所示,质点 1 沿着 aa 方向移动 t 距离($t=\frac{1}{2}T$ 为结点间距),然后再对 aa 平面进行反映,则与相当的质点 2 重合,同样的道理 2 与 3 自相重合,如果将 aa 面左边所有的质点皆平行 aa 移动$\frac{T}{2}$距离,然后对 aa 面反映,则所有质点皆与其相同的质点重合。aa 面称滑移面。同理,bb 面亦为滑移面。

又如图 1.7.14 黄铁矿晶体,虚线所示亦为滑移面,原因同上。

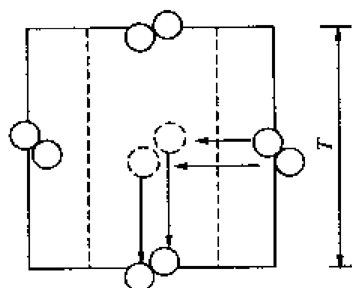


图 1.7.14 黄铁矿晶体结构中的(011)面网

图中双圈表示$[S_2]^{2-}$一对阴离子,Fe^{2+}在图中未示出。在此结构中存在有象移面 a,如图中虚线所示。

显然,滑移面当其平移距离等于零,即 $t=0$ 时,则脱化成为对称面。所以滑移面在晶体外形的宏观对称中就表现为对称面。

滑移面按其平移方向与距离的不同,可分为轴向滑移的、面对角线滑移的五种滑移面。

轴向滑移面有:

a:表示滑移方向平行 X 轴,滑移距离为 $a/2$。

b:表示滑移方向平行于 Y 轴,滑移距离为 $b/2$。

c:表示滑移方向平行于 Z 轴,滑移距离为 $c/2$。

面对角线滑移面有:

n:表示滑移方向平行于面对角线方向,滑移距离为$\frac{1}{2}(a+b)$或$\frac{1}{2}(a+c)$,$\frac{1}{2}(b+c)$。

d：表示滑移方向平行于面对角线方向，滑移距离为$\frac{1}{4}(a+b)$或$\frac{1}{4}(a+c)$，$\frac{1}{4}(b+c)$。

各种滑移面的示意图如图 1.7.15 所示，图中各个面均垂直于纸面，黑点位于图纸平面上，注有 1/2、1/4、3/4 者则高出图纸平面，其数字即表示当以垂直图面方向上的结点间距为 1 时，它们所高出图面的距离。

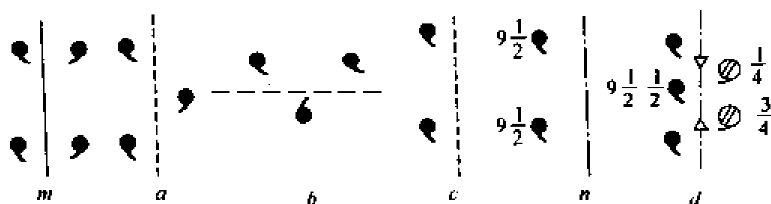


图 1.7.15 对称面 m 和滑移面 a、b、c、n、d

综上所述，在晶体结构中可能存在的对称要素有：

(1)对称面类

对称面：P；

滑移面：a、b、c、d、n。

(2)对称轴类：

对称轴：L^1、L^2、L^3、L^4、L^6；

螺旋轴：2_1、3_1、3_2、4_1、4_2、4_3、6_1、6_2、6_3、6_4、6_5；

反伸轴：L_i^4、L_i^6；

反映轴：从略(可用反伸轴代替)；

平移轴：(等于移动格子)即十四种布拉维格子。

(3)对称中心 C

显然，晶体内部构造中的对称要素要比晶体外形上的对称要素要复杂得多，那么，它的对称要素组合也相应的要复杂起来，正因为有了这点，晶体内部构造的对称要素，才能按不同的组合方式把晶体内部的质点联系起来，并成有规则地排列，且作周期性地重复，从而构成了晶体内部结构。

7.3 空间群的概念及其与对称型的关系

7.3.1 空间群的概念

我们在第 4 章讨论了一个晶体外形所具有的全部对称要素之总和，并以一定顺序组合排列之，称为该晶体的对称型，且只有 32 种对称型。其晶面、晶棱、角顶在晶体上的分布都必须符合晶体的对称型。

相似的，在一个晶体结构中，其一切对称要素的组合所构成的对称群，称为该晶体的空间群。

显然，晶体内部构造的组合方式要比晶体外形多得多，单纯从数学观点而言，它们的组合方式将是无限的，但也与对称型的情况相类似，要受到格子构造规律的限制，实际上它们的组合方式是有限的。

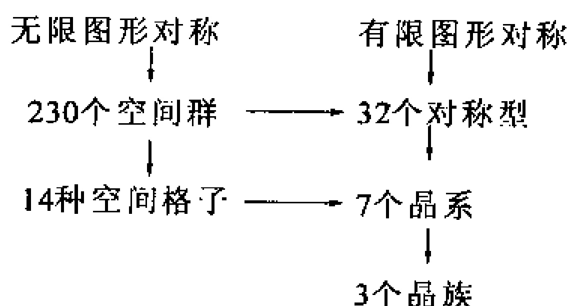
根据费道洛夫于 1885 年用数学方法推导出晶体结构中只有 230 种不同的对称要素组合方式，我们通常称之为 230 个空间群。

7.3.2 空间群与对称型的关系

空间群是表示晶体内部构造的对称规律，对称型是表示晶体外形的对称规律，而它又是以晶体内部结构中的对称为依据的，所以它们之间既有区别又是统一的。

区别表现在，空间群是作为一个无限图形，因而存在平移这一动作，出现了新的对称要素，而且对称要素不相交一点，每一种对称要素都有无限多，而对称型则是一个有限图形，不存在平移这一动作，不存在微观中特有的微观对称要素，其对称要素相交于一点(亦称点群)。每一种对称要素均是有限的。它们的统一方面表现为：如果设想把空间群中的平移因素消除掉的话，那么螺旋轴、滑移面将变成相应的对称轴和对称面，230 个空间群就将脱化为 32 种对称型，无限图形变成有限图形，空间群就变成了对应的对称型。不过，这种讲法只是形式上的比较，实际上并不存在这样的变化过程。

他们的关系可以作如下表示：



从空间群和对称型的关系可知，每一个空间群都与一定的对称型相适应，而每个对称型各有若干个与之相适应的空间群，14 种格子类型是晶体内部构造微观对称特点的抽象和概括，分属于 7 个晶系，230 个空间群，反映到晶体外形上只有 32 个对称型，32 个对称型也归属于 7 个晶系，又归为 3 个晶族。

以上诸项有机的联系，全面系统地阐明了晶体的几何对称规律。同时，晶体外形可以因生长环境的影响而使对称有所歪曲，而内部构造的对称仍可保存，因此晶体的真实对称是其构造的对称。

230 个空间群在各晶系、各对称型中的分布情况如表 1.7.2 所列。

以上所说的晶体的几何对称规律已极其完美地阐明了，由于科学是在不断地向前发展，它并不是认识的最后总结，从 1951 年开始，前苏联学者舒勃尼柯夫创立了正、负对称性，反对称的概念，增加了新的对称要素——反对称要素，推演出了更为复杂的 1651 个舒勃尼柯夫群，14 种格子增加到 36 种，他们的工作把人类对于晶体结构规律的认识又往前推进了一步。

7.4 对称型及空间群国际符号的构成

7.4.1 对称型国际符号的构成

对称型国际符号仍指海尔曼-摩根(Hermann-Mauguin)符号。

对称型国际符号中只采用三类对称要素，即：

①对称面(P)用符号 m 来表示。

②对称轴 L^1、L^2、L^3、L^4、L^6 用符号 1、2、3、4、6 表示。

③反伸轴 L_i^1、L_i^2、L_i^3、L_i^4、L_i^6 用符号 $\bar{1}$、$\bar{2}$、$\bar{3}$、$\bar{4}$、$\bar{6}$ 表示。

其中 $\bar{1}$ 还用以代表对称中心 $\bar{1}=C$，但 $\bar{2}$ 可由对称面 m 来表示 $m=\bar{2}$。

对称型的国际符号，由不超过三个位构成，这三个位中，每个位表示某一晶系的一个晶向，即窥视方向，每一位符号上所表示出的对称要素就是在此相应的方向上出现的对称要素。若有与该方向垂直的对称面，根据此原则当这两类对称要素在同一方向上同时出现时，则写成分式的形式，例如$\frac{4}{m}$(但通常写成 $4/m$ 的形式)，即表示该方向上有一四次对称轴(与该方向平行)，同时还有一个对称面与它垂直(亦与该方向垂直)。

在各个晶系中，每个位所代表的方向，如表 1.7.2 和图 1.7.16 所列。

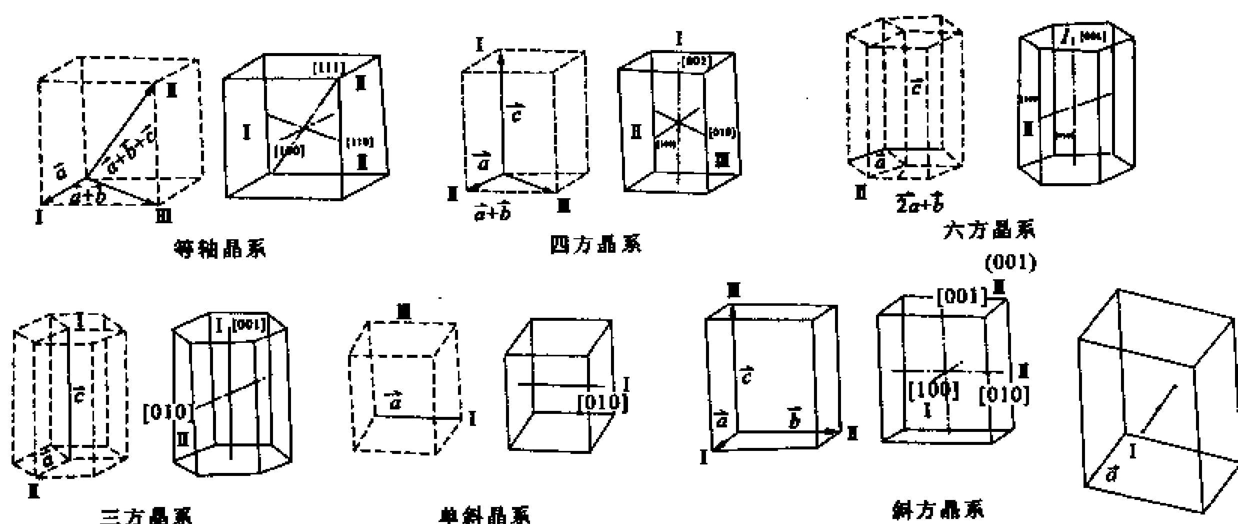


图 1.7.16 各晶系中与国际符号三个位相应的方向

从表及图中可知，三方晶系由两个位，而单斜及三斜晶系则由一个位组成。如果晶体中与某一个位相对应的方向上没有对称要素存在时，则将该位空着，或用 1 来填补空缺，除了在三斜晶系只有一个对称中心($\bar{1}$)和一个一次对称轴(1)等两个对称型不能空缺外，一般情况下，一次对称轴无意义，均不予考虑，而一次反伸轴与对称中心等效，但它们作为一个从属的对称要素，没有必要再在符号中予以特别表明。

一般说来，一个对称型所具有的全部对称要素并不能全部在国际符号上得到直接反映，符号中所示出的对称要素只是作为基础的对称要素，而其余的则可以由它们推导得出。

例如四方晶系的 $L^4 4L^2 5PC$ 对称型。

第一位 C，以此方向窥视对称要素存在有与其平行的四次轴和与其垂直的对称面，符号为$\frac{4}{m}$。

第二位 a，在此方向窥视对称要素存在有与其平行的二次轴和与其垂直的对称面，符号为$\frac{2}{m}$。

第三位 $a+b$，在此方向窥视的对称要素同于第二位，其符号亦为$\frac{2}{m}$。

因而 $L^4 4L^2 5PC$ 对称型的国际符号为$\frac{4}{m}$、$\frac{2}{m}$、$\frac{2}{m}$，只列出一个 L^4、两个 L^2、三个 P，其余的两个 L^2、两个 P 和 C 没有在符号中直接表示出来，但根据对称要素组合关系，由符号中写出的那些对称要素，必定可以导出对称型的全部对称要素，实际上，在此对称型中，还可省略掉两个 L^2，仅剩下$\frac{4}{m}mm$（通常写成 $4/mmm$ 的形式），仍然可以导出全部对称要素来。必须注意，$4/mmm$ 的写法，它仍然是由三个位构成的，读时必须一个位、一个位地读，即读成 m 分之 4、m、m，而不能读成 m、m、m 分之 4。其他对称型中也有类似的情况。

又如等轴晶系 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$ 对称型。

第一位 a，此方向存在的相应的对称要素有四次轴和对称面，它们成垂直的关系，符号为$\frac{4}{m}$。

第二位 $a+b+c$，此方向相应存在的对称要素有三次轴和对称中心，其符号为 $L^3+C=L_i^3=\overline{3}$。

第三位 $a+b$，此方向相应存在的对称要素有二次轴和对称面，它们成垂直的关系，符号为$\frac{2}{m}$。

所以 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$ 对称型的国际符号为$\frac{3}{m}\overline{3}\ \frac{2}{m}$，亦可写成 $m3m$。

32 种对称型的国际符号参看第 4 章表 1.4.1 及本章表 1.7.2。

从国际符号上来判别该对称型属于哪一晶系甚为简便，如三斜晶系只可能出现 1 或 $\overline{1}$，单斜及斜方晶系中则出现了 m 或 2，但没有 $\overline{3}$、$\overline{4}$、$\overline{6}$ 或 3、4、6，四方、三方及六方晶系中，它们的第一位分别必为 4（或 $\overline{4}$）、3（或 $\overline{3}$）、6（或 $\overline{6}$），而在等轴晶系中，因在其 $a+b+c$ 方向上总是具有三次轴，故其符号的第二位上永远为 3 或 $\overline{3}$。

7.4.2 空间群国际符号的构成

了解了对称型国际符号，就易于理解空间群的国际符号。空间群的国际符号由两部分组成，即：符号前面的字母表示空间格子类型，后面部分则与对称型的国际符号相对应，不过要将其中的宏观对称要素符号换成微观对称要素符号。

例如，空间群符号 $I4_1/amd$，它表明空间格子类型为 I，属于四方体心格子，在 Z 轴方向上有 4_1，垂直 4_1 有滑移面 a，在垂直 X 轴方向上有对称面 m，垂直 X、Y 轴夹角分角线的方向上有滑移面 d，去掉平移概念可知该空间群所属对称型（点群）则为 $4/mmm$，即 $L^4 4L^2 5PC$。

又如，空间群符号 $P\frac{2_1}{b}$、$\frac{2}{c}$、$\frac{2_1}{n}$缩写为 $Pbcn$，则表明空间格子类型为 P，属于斜方原始格子，由后半部分可知平行 X 轴方向上有 2 及垂直 X 轴方向的滑移面 b，平行 Y 轴方向有 2，垂直 Y 轴方向有滑移面 c；平行 Z 轴有 2_1，垂直 Z 轴有滑移面 n，同样去掉平移概念，则该空间群所属对称型为$\frac{2}{m}$、$\frac{2}{m}$、$\frac{2}{m}$（缩写为 mmm），即 $3L^2 3PC$。

各晶系 32 种对称型所包括空间群之国际符号参看表 1.7.2。从表中可知，每一个空间群都与一定的对称型相对应，而每个对称型各有若干个与之相适应的空间群。如对称型

$L^4(C_4)$，与它相应的空间群就有 6 个，即 $P4$、$P41$、$P42$、$P43$、$I4$、$I4_1$。对称型 $3L^23PC$ 与它相应的空间群则有 28 个等等。

7.5 对称型及空间群熊夫利斯符号的构成

7.5.1 对称型熊夫利斯符号的构成

熊夫利斯又译圣富利斯（Schoenflies），这种符号非常简单，但不够一目了然，目前，一般常用国际符号，但有些文献、论文、教材有时也引用这种符号，有必要简介一下。

C_n：表示只有一个对称轴的点群。如 $C_2=L^2$，$C_3=L^3$，即 $C_n=L^n$。

C_{nh}：表示在垂直 L^n 的方向上有一对称面。如 $C_{1h}=P=Cs$，$C_{2h}=L^2PC$，$C_{3h}=L^3P=L_i^6$，$C_{4h}=L^4PC$，$C_{6h}=L^6PC$。

C_{nv}：表示在平行 L^n 的方向上有"n"个对称面。如 $C_{1v}=L^1P=P$，$C_{2v}=L^22P$，$C_{3v}=L^33P$、$C_{4v}=L^44P$、$C_{6v}=L^66P$。

D_n：表示对称轴的最高轴次为"n"，而且在垂直 L^n 的方向上还有"n"个 L^2。如 $D_1=L^1L^2=L^2$，$D_2=L^22L^2=3L^2$，$D_3=L^33L^2$、$D_4=L^44L^2$、$D_6=L^66L^2$。

D_{nh}：表示在 D_n 的基础上，还有$(n+1)$个对称面和 D_n 所代表的对称轴垂直。如 $D_{1h}=L^22P$，$D_{2h}=3L^23PC$，$D_{3h}=L^33L^24P$，$D_{4h}=L^44L^25PC$，$D_{6h}=L^66L^27PC$。

S_n：表示具有旋转反映轴的对称型。如 $S_4=L_i^4$、$S_2=L_i^2$、$S_6=L_i^6=L_i^3$

D_{nd}：表示在旋转反映轴的方向上还有"n"个 L^2 等。如 $D_{3d}=L_3^63L^23P=L^33L^23PC$，$D_{2d}=L_i^42L^22P$。

其余 T、T_h、T_d、O、O_h 则各自分别代表等轴晶系的一个点群：$T=4L^33L^2$，$T_h=4L^33L^23PC$，$T_d=3L_i^44L^36P$，$O=3L^44L^36L^2$，$O_h=3L^44L^36L^29PC$。

从上述可知，熊夫利斯符号采用的基本对称要素有对称面、对称轴、反映轴（这里不用反伸轴）、对称中心作为从属对称要素，不在符号中出现。

根据熊夫利斯符号来判别该对称型所属晶系方法如下：有记号 T 或 O 者属于等轴晶系，在符号右下角出现 3、4、6 者则分别属于三方、四方和六方晶系，由于采用反映轴的关系，有几个例外：$C_{3h}(=\bar{6})$和 $D_{3h}(=\bar{6}m2)$属于六方晶系，$S_6(=\bar{3})$属于三方晶系，D_{2d}属于四方晶系，符号右下角的数字为 1 或 2，或者没有数字的则属于低级晶族，至于它们究竟是属于哪个晶系，则只有从整个符号所代表的意义上来区别。

32 种对称型的熊夫利斯符号参看表 1.7.2。

7.5.2 空间群熊夫利斯符号的构成

利用熊夫利斯符号表示空间群极为简单，它是在对称型的熊夫利斯符号的右上角加一个编号即成，此编号表示此空间群在其相应的对称型中所包括的空间群的序号。

例如对称型 $L^4(C_4)$有六个空间群，熊夫利斯符号则为 C_4^1、C_4^2、C_4^3、C_4^4、C_4^5、C_4^6，其相应的国际符号为 $P4$、$P4_1$、$P4_2$、$P4_3$、$I4$、$I4_1$。又如金红石（TiO_2），L^44L^25PC 对称型，其对称型的国际符号为 $4/mmm$，熊夫利斯符号为 D_{4h}，其空间群的国际符号为 $P4_2/mnm$。序号为 14，则空间群的熊夫利斯符号为 D_{4h}^{14}。

关于空间群的熊夫利斯符号参看表 1.7.2。

表 1.7.2　230 个空间群

晶系	对称型			空间群	
	对称要素总和	熊夫利斯符号	国际符号	熊夫利斯符号	国际符号
三斜	L^1	C_1	1	Q^1	$P1$
	C	C_i	$\bar{1}$	C_i^1	$P\bar{1}$
单斜	L^2	C_2	2	$C_2^{(1-3)}$	$P2$、$P2_1$、$C2$
	P	C_s	m	$C_s^{(1-4)}$	Pm、Pc、Cm、Cc
	L^2PC	C_{2h}	$2/m$	$C_{2h}^{(1-6)}$	$P2/m$、$P2_1/m$、$C2/m$、$P2/c$、$P2_1/c$、$C2/c$
斜方	$3L^2$	D_2	222	$D_2^{(1-9)}$	$P222$、$P222_1$、$P2_12_12$、$P2_12_12_1$、$C222_1$、$C222$、$F222$、$I222$、$I2_12_12_1$
	L^22P	C_{2v}	mm_2	$C_{2v}^{(1-22)}$	$P_{mm}2$、$P_{mc}2_1$、$P_{cc}2$、$P_{ma}2$、$P_{ca}2$、$P_{nc}2$、$P_{mn}2_1$、$P_{ba}2$、$P_{na}2_1$、$P_{nn}2$、$C_{mm}2$、$C_{mc}2_1$、$C_{cc}d$、$A_{mm}2$、$A_{bm}2$、$A_{ma}2$、$A_{ba}2$、$F_{mm}2$、$F_{dd}2$、$I_{mm}2$、$I_{ba}2$、$I_{ma}2$
	$3L^23PC$	D_{2h}	$\frac{2}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m}$	$D_{2h}^{(1-28)}$	P_{mmm}、P_{nnn}、P_{ban}、P_{mma}、P_{nna}、P_{cca}、P_{bam}、P_{ccn}、P_{bcm}、P_{nnm}、P_{mmn}、P_{bcn}、P_{bca}、P_{nma}、C_{mcm}、C_{mca}、C_{mmm}、C_{ccm}、C_{mma}、C_{cca}、F_{mmm}、F_{ddd}、I_{mmm}、I_{bam}、I_{bca}、I_{mma}
四方	L^4	C_4	4	$C_4^{(1-6)}$	P_4、$P4_1$、$P4_2$、$P4_3$、I_4、$I4_1$
	L_i^4	S_4	$\bar{4}$	$S_4(1-2)$	$P\bar{4}$、$I\bar{4}$
	L^4PC	C_{4h}	$4/m$	$C_{4h}(1-6)$	$P4/m$、$P4_2/m$、$P4/n$、$P4_2/n$、$I4/m$、$I4_1/a$
	L^44L^2	D_4	422	$D_4(1-10)$	$P422$、$P42_12$、$P4_122$、$P4_12_12$、$P4_222$、$P4_22_12$、$P4_322$、$P4_32_12$、$I422$、$I4_122$
	L^44P	C_{4v}	$4mm$	$C_{4v}^{(1-12)}$	$P4mmm$、$P4bm$、$P4_2cm$、$P4cc$、$P4nc$、$P4_2mc$、$P4_2bc$、$I4mm$、$I4cm$、$I4nnd$、$I4_1cd$
	$L_i^42L^22P$	D_{2d}	$42m$	$D_{2d}^{(1-12)}$	$P\bar{4}2m$、$P\bar{4}2c$、$P\bar{4}2m$、$P\bar{4}2_1c$、$P\bar{4}m_2$、$P\bar{4}c_2$、$P\bar{4}b_3$、$I\bar{4}n_3$、$I\bar{4}c_2$、$I\bar{4}2m$、$I\bar{4}2d$
	L^44L^25PC	D_{4h}	$\frac{4}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m}$	$D_{4h}^{(1-20)}$	$P4/mmm$、$P4/mmc$、$P4/nbm$、$P4/nnc$、$P4/mbm$、$P4/mnc$、$P4/nmm$、$P4/ncc$、$P4_2/mmc$、$P4_2/mcm$、$P4_2/nbc$、$P4_2/nnm$、$P4_2/mbc$、$P4_2/mnm$、$P4_2/nmc$、$P4_2/ncm$、$I4/mmm$、$I4/mcm$、$I4_1/amd$、$I4_1/acd$
三方	L^3	C_3	3	$C_3^{(1-4)}$	$P3$、$P3_1$、$P3_2$、$R3$
	L^3C	$C3i$	$\bar{3}$	$C_{3i}^{(1-2)}$	$P\bar{3}$、$R\bar{3}$
	L^33L^2	$D3$	3_2	$D_3^{(1-7)}$	$P312$、$P321$、$P3_112$、$P3_121$、$P3_212$、$P3_221$、$R32$
	L^33P	$C3v$	$3m$	$C_{3v}^{(1-6)}$	$P3m1$、$P31m$、$P3c1$、$P31c$、$R3m$、$R\bar{3}c$
	L^33L^2PC	$D3d$	$\bar{3}\frac{2}{m}$	$D_{3d}^{(1-6)}$	$P\bar{3}1m$、$P1\bar{3}c$、$P\bar{3}m1$、$P\bar{3}c1$、$R\bar{3}m$、$R\bar{3}c$

续表 1.7.2

晶系	对称型			空间群	
	对称要素总和	熊夫利斯符号	国际符号	熊夫利斯符号	国际符号
六方	L^6	C_6	6	$C_6^{(1-6)}$	$P6$、$P6_1$、$P6_5$、$P6_2$、$P6_4$、$P6_3$
	L_i^6	$C3h$	$\bar{6}$	$C_{3h}^{(1)}$	$P\bar{6}$
	L^6PC	$C6h$	$6/m$	$C_{6h}^{(1-2)}$	$P6/m$、$P6_3/m$
	L^65L^2	$D6$	622	$D_6^{(1-6)}$	$P622$、$P6_122$、$P6_522$、$P6_222$、$P6_422$、$P6_322$
	$L66P$	$C6v$	$6mm$	$C_{6v}^{(1-4)}$	$P6mm$、$P6cc$、$P6_3cm$、$P6_3mc$
	$L_i^63L^23P$	$D3h$	$\bar{6}m2$	$D_{3h}^{(1-4)}$	$P\bar{6}m2$、$P\bar{6}c2$、$P\bar{6}2m$、$P\bar{6}2c$
	L^66L^27PC	$D6h$	$6/mmm$	$D_{6h}^{(1-4)}$	$P6/mmm$、$P6/mcc$、$P6_3/mcm$、$P6_3/mmc$
等轴	$3L^24L^3$	T	23	$T^{(1-5)}$	$P23$、$F23$、$I23$、$P2_13$、$I2_13$
	$3L^24L^33PC$	Th	$m\bar{3}$	$Th^{(1-7)}$	$Pm3$、$Pn3$、$Fm3$、$Fd3$、$Im3$、$Pa3$、$Ia3$
	$3L^44L^36L^2$	O	432	$O^{(1-8)}$	$P432$、$P4_232$、$F432$、$F4_132$、$I432$、$P4_332$、$P4_132$、$I4_132$
	$3L_i^44L^36P$	Td	$\bar{4}3m$	(1−6)	$P\bar{4}3m$、$F\bar{4}3m$、$I\bar{4}3m$、$P\bar{4}3m$、$F\bar{4}\bar{3}c$、$I\bar{4}3d$
	$3L^44L^36L^29PC$	Oh	$m\bar{3}m$	$O_h^{(1-10)}$	$Pm\bar{3}m$、$Pn\bar{3}m$、$Pm\bar{3}n$、$Pn\bar{3}m$、$Fm\bar{3}m$、$Fm\bar{3}c$、$Fm\bar{3}m$、$Fm\bar{3}c$、$Fd\bar{3}m$、$Fd\bar{3}c$、$Im\bar{3}m$、$Ia\bar{3}d$

1.7.3 国际符号中各个符号在每个晶系中代表的方向

晶系	符号位序	代表的方向(以单位平行六面体之三个矢量表示)	以晶棱符号表示	备注
等轴	1	$\vec{a}$(立方体的棱)	[100]	
	2	$\vec{a}+\vec{b}+\vec{c}$(立方体的体对角线)	[111]	
	3	$\vec{a}+\vec{b}$(立方体的面对角线)	[110]	
六方	1	$\vec{c}$(六次轴)	[001]	
	2	$\vec{a}$(与六次轴垂直)	[100]	
	3	$2\vec{a}+\vec{b}$(与六次轴垂直,并与 a 交成 30°)	[210]	
四方	1	$\vec{c}$(四次轴)	[001]	
	2	$\vec{a}$(与四次轴垂直)	[100]	
	3	$\vec{a}+\vec{b}$(与四次轴垂直,并与 a 交成 45°)	[110]	
三方	1	$\vec{c}$(三次轴)	[001]	
	2	$\vec{a}$(与三次轴垂直)	[100]	
斜方	1	$\vec{a}$	[100]	
	2	$\vec{b}$(三个互相垂直的二次轴)	[010]	
	3	$\vec{c}$	[001]	
单斜	1	$\vec{b}$(二次轴)	[010]	
三斜	1	$\vec{a}$(一次轴)	[100]	实际为任意方向

第二篇　矿　物　学

1 矿物概论

1.1 矿物和矿物学的概念

矿物学是以矿物为研究对象的一门地质基础学科，它是研究地壳物质成分的学科之一。

矿物是在各种地质作用中所形成的天然单质或化合物；它们具有一定的化学成分和内部结构，从而有一定的形态、物理性质和化学性质；它们在一定的地质和物理化学条件下稳定；是组成岩石和矿石的基本单位。

在地壳演化的过程中，由各种地质作用形成的物质是多种多样的，它们可以呈固态（如磁铁矿、黄铜矿、石英、石盐等）、液态（如水、自然汞等）、气态（如火山喷气中的二氧化碳和水蒸气等）或胶凝体（如蛋白石等）。地壳的气圈、水圈和岩石圈便是根据物质存在的主要物理状态来划分的。但由于气态和液态物质各有其特殊的属性而纳入其他学科的研究领域，当前一般矿物学只把晶质固体称为矿物（非晶质称准矿物 mineraloid），作为它的主要研究对象。

在地壳中矿物的分布是很广泛的。如盐湖中的盐，砂中的金，花岗岩中的石英、长石和云母等都是矿物。

在实验室条件下，虽然可以获得某些成分和性质与天然矿物类似的物质，但由于它们系人工合成而不是天然地质作用的产物，故称为"人造矿物"或"合成矿物"。陨石、月岩来自其他天体，其中的矿物称为"陨石矿物"、"月岩矿物"，或称它们为"宇宙矿物"。这样可以将它们与地壳中所形成的矿物相区别。

矿物具有一定的化学成分，作为结晶物质它们还具有一定的内部结构，从而也具有一定的形态、物理和化学性质。但由于地质条件的复杂性和多样性，矿物的成分、结构和它们的形态、性质也并非是绝对一定不变的。由于生成条件的不同，成分、结构和形态、性质均可有不同程度的差异，但这种差异只发生在一定范围之内，其主要的成分、结构仍不改变。这种不变的属性便构成了矿物种的属性，它将这一矿物种与其他矿物种区分开来，同时，这种在一定范围内的变化状况，可为详细研究矿物的形成条件、用途等提供资料。

任何一种矿物都只在一定的地质条件下才是相对稳定的，当外界条件改变到一定程度时，原有的矿物就要发生变化，同时生成新的矿物。例如黄铁矿，与空气和水分接触，就要发生变化，生成褐铁矿。

矿物是地壳中岩石和矿石的组成单位，是成分、结构比较均一，可以独立区分出来加以研究的自然物体。岩石和矿石是由矿物组成的。例如花岗岩是由长石、石英和云母组成，铅锌矿石是由方铅矿和闪锌矿等组成。应该指出，组成岩石或矿石中的矿物，它们在空间上、时间上的集合是有一定规律的，这决定于矿物的成分与结构，同时与形成时的地质条件密切相关。

矿物学是地质科学的一门分科。它是研究地壳物质成分特性及其历史的学科之一，它不仅研究矿物的成分、结构、形态、性质、成因、产状、用途和它们的内在联系，而且还研究矿物在时间和空间中的分布规律及其形成和变化的历史。

近几年来，随着科学和技术的发展，扩大了矿物的概念，它包括了宇宙空间及地球内层形成的自然产物。因此，有人认为：矿物是自然过程中所产生的单质或化合物，矿物学则是研究这些产物及其变化的过程的，所以它是研究整个自然界（即不仅是地壳）物质成分特性及其演变历史的科学。

1.2 矿物学的内容及其与其他科学的关系

1. 矿物学的内容

矿物学是全面研究和利用矿物的一门科学，因此对于矿物的各个方面的研究就构成了矿物学的内容，具体来说就是研究矿物的化学成分、内部构造、外表形态、物理性质和化学性质及其在地质作用过程中形成和变化的条件等诸方面的现象和规律以及它们相互的内在联系。

通过这些内容的研究，为开发工农业生产所需的矿物原料及合理综合利用以及寻找应用于尖端技术的矿物材料，提供必要的充分的依据。同时也为探索并阐明地壳及其他天体的物质组成及演化规律，提供重要的实际资料。

根据对矿物研究方面的不同，在矿物学中可划分下列一些分支：

①物理矿物学——用物理学理论和方法进行矿物的研究。

②化学矿物学——研究矿物的化学成分及同化学有关的所有特性。

③结构矿物学——研究矿物的内部结构。

④形态矿物学——研究矿物晶体形态，矿物个体的发芽、生长、发展变化及它们的规则连生。

⑤成因矿物学——研究矿物和矿物综合体的形成与起源，从化学、物理学、物理化学和地质学观点考查它们的成因。

⑥实验矿物学——从事合成矿物以及在各种物理化学条件下模拟和探索矿物的形成过程。通过实验可以检验岩浆作用、变质作用和表生作用过程的概念。

⑦实用矿物学——研究矿物在工农业及国防工业中的应用。

⑧综合矿物学——对矿物个体及矿物种的研究资料进行系统整理。这种整理工作有可能将各矿物的特性互相联系起来，经过综合分析，对矿物种进行分类，据此可确定每一种矿物在矿物界总系统中的位置。

上述矿物学的内容和矿物学的分支是相互联系着的，并组成统一的整体——矿物学。由此可见，矿物学与一系列理论科学和技术科学有着密切的关系。

2. 矿物学与其他科学的关系

首先在地质科学中，结晶学是矿物学的基础。这是由于地壳中的矿物是以固态结晶物质为主，是在地质作用下生成的天然晶体，因此，在矿物学的许多方面都要涉及到结晶学的内容，如晶体外形上的几何性质、晶体内部构造、化学组成及其与物理性质的关系等。这些问题的研究是矿物学的一个重要组成部分。

矿物学又是岩石学和矿床学的基础，由于矿物是岩石和矿石的组成部分，对于造岩矿物和矿石矿物的鉴定、利用等，都不能脱离矿物学。而岩石、矿床成因的探讨和各种有用矿物赋存规律的研究，也主要是以矿物成因的探讨为基础的。

地球化学与矿物学的联系更为广泛。在地壳中不断运动着的自然元素的质点，在矿物中

结合成暂时稳定的统一体，而后通过矿物的破坏又各自分开。所以说："矿物是元素迁移的中间站"，因此，要研究地球中化学元素的分布、迁移、分散和富集规律便需要广泛的矿物学知识。

其他的地质学科，包括地史学、地层学和古生物学、水文地质学、工程地质学、地震学等，均与矿物学有直接或间接的联系。

矿物学除了与各地质学科有着直接的关系外，还与其他的一些基础学科如数学、物理学和化学有着紧密的联系，这些学科为研究矿物的各方面性质提供了理论基础和实验手段，尤其是近年来，近代物理学和化学方面的理论和实验技术在矿物学上逐步普遍应用，给矿物学的研究开辟了更广阔的前景。

1.3 矿物学的实际意义

矿物学的实际意义归纳起来大致有以下几点：

①对矿物学的不断研究可以发展新的自然学科。如结晶学、岩石学均是从矿物学中分出来的已成独立的科学，目前又从矿物学发展了结晶化学、矿物物理学、地球化学等新的学科。

②发现新元素、新矿物。化学上许多元素，如铀、锆、锶、钛等都是从矿物学的研究中发现的。

③推动其他科学的发展。如对矿物的特殊物理性质的研究，扩大了物理学的内容，如双折射、偏光、电气石的热电现象以及萤石的荧光现象，这些研究均推动了物理学的发展。

④提供国民经济建设中充足的矿物原料基地。国民经济建设中，工业、农业、国防事业和科学技术的发展都离不开矿物原料和材料。如冶金工业需要大量的各种金属铁、锰、铅、锌、钨、铜、镍、铝炼制各种钢材合金和纯金属供机器制造业、造船业、电器工业、国防工业等需要；化学工业需要大量的黄铁矿、硫、硝石、萤石以及钾、钠、镁、硼等；陶瓷工业和耐火材料、绝缘材料工业则需要大量的石英、长石、高岭石、滑石、云母、石棉等；原子能工业需要铀、钍；火箭和人造卫星中需要钨、铜、钽、铌、铼、锗、铊等；光学仪器中需要高质量的水晶、冰洲石、电气石等；农业上需要大量的钾盐、磷盐和硝石、石膏、石灰石等。

因此，对矿物学的研究可以有效地肩负着扩大矿物原料基地和提供综合利用矿物原料可能性的巨大任务。

1.4 矿物学与陶瓷业的关系

由于陶瓷工业中所用的原料(包括坯用原料、釉用原料、色料用原料)绝大部分来自于天然产出的矿物，如石英、钾长石、钠长石、高岭石、滑石、叶蜡石、硅灰石、透辉石、方解石、白云石、锂辉石、堇青石、石膏、锆英石、闪锌矿、金红石、硼砂等。在大自然中共存在 3300 多种矿物，陶瓷工业中大约用到了数百种，除了这些天然矿物之外，还用到了一些化工原料，如氧化钴、氧化锡、氧化锌、硼酸、氧化铜、氧化钛、五氧化二钒、氧化铬、氧化锰等，这些化工原料亦是由天然矿物原料经提纯所得。随着陶瓷工业的发展，一些矿业尾砂和工业废渣如高岭土尾砂、瓷石矿尾砂、萤石矿尾砂、硅灰石尾砂、铌钽矿尾砂、粉煤灰、煤矸石、高炉渣、钢渣等在建筑陶瓷工业的应用得到深入研究。有的尾砂、尾矿及工业固体废物已用在外墙砖、内墙砖、玻化砖的坯体配方中。综上所述，显然矿物学是陶瓷业不可缺少的知识，只有综合掌握了矿物的化学成分、结

构、物理性质、鉴定特征，才能真正明白矿物和陶瓷之关系，才能真正明白哪些矿物可作为陶瓷工业的瘠性原料，哪些矿物可作为陶瓷工业的助熔性原料，哪些矿物可作为陶瓷工业的可塑性原料，哪些矿物是陶瓷工业的有害原料。当然，除了识别矿物、掌握矿物与陶瓷工业的应用外，还应了解矿物之间的共生组合规律、矿物的颗粒度、矿物原料与加工工艺等矿物学的基本理论。

2 矿物的化学成分

矿物的化学成分和晶体结构是决定矿物形态和一切性质的两个最基本的因素。因此，研究矿物时，全面了解矿物的化学成分是非常必要的。

又因为矿物的形成是地壳中各种化学元素迁移、运动、分散、聚集的结果，地壳的化学成分是矿物化学成分的基础，故在介绍矿物化学成分之前，必须首先了解地壳的化学成分。

2.1 地壳的化学成分

门捷列夫元素周期表中大多数元素(除超铀元素外)在地壳中均可存在，但是各种元素在地壳中的分布是极不均匀的，含量相差可达 10^{16} 倍。

美国学者 F. W · 克拉克(F. W. Clark)认为深达 16km 的固态地壳中，95%是火成岩，5%是沉积岩(页岩 4%、矿岩 0.75%、石灰岩 0.25%)。而沉积岩是由火成岩形成的，因此，要了解地壳的化学成分，必须充分地测定组成固态地壳的所有火成岩的平均化学成分，根据这点，克拉克在 40 年中对 16km 厚的固体地壳取了岩样 5159 个，进行了将近 7000 次的化学全分析，于 1889 年和美国学者华盛顿(H. S. Washington)首先发表了约 50 种分布最广的化学元素在地壳中的平均含量，他们所得出的数值经过后人实践检验，还是相当准确的。后来，前苏联学者费尔斯曼、维诺格拉多夫等对克拉克和华盛顿的研究结果又作了一些修改，为了纪念和表彰克拉克在发展地壳化学元素分布学说中的特殊功绩，人们把地壳中元素平均含量的百分比称为“克拉克值”或称为“重量克拉克值”。

由于各元素的原子量不同，有了重量百分比的概念，还不能正确估计元素的相对多少，因为较重的原子其克拉克值都偏高了，而较轻的原子又显得偏低，因此人们采用了各该元素的原子数在地壳中所有元素总的原子数中所占有百分数来表示，此数值称为“原子克拉克值”。如表 2.2.1 所列即将每一元素的克拉克值除以该元素的原子量，得出该元素的原子因数，然后将所求出的各种元素原子数化为百分数来表示。从表 2.2.1 中可以看出：

①地壳中各种化学元素的平均含量是极不均匀的，仅 O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、H 等 10 种元素就占了地壳总重量的 98.74%，地壳总原子数的 99.83%，而其他所有元素只占地壳总重量的 1.26%，地壳总原子数的 0.17%，其中 O 差不多占了地壳总重量的一半，Si 占了 1/4 强。

在地壳中确实也是以 Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg 的氧化物和含氧盐(特别是硅酸盐)的矿物分布最广，它们是构成地壳的各类岩石的主要成分。

②如果考虑克拉克值和周期表中原子序数的关系则发现：元素的克拉克值一般随原子序数增大而降低，即克拉克值高的元素分布于周期表的开端，即从原子序数为 1(H)—26(Fe)。而自原子序数 27(CO)开始，克拉克值则有显著降低。

同时，周期表上相邻二元素中，原子序数为偶数的克拉克值常大于为奇数的元素含量。就同一元素而言，质量数为偶数的同位素平均含量大于相邻奇数同位素的平均含量。如 O^{16} 占

整个氧元素的 99.76%、O^{17}占 0.02%、O^{18}占 0.004%。

表 2.2.1 组成地壳的部分元素重量克拉克值及原子克拉克值

元素及其符号	重量克拉克值(%)	原子克拉克值(%)	
		换　算	结　果
氧 O	49.13	$\frac{49.13}{16}=3.07$	$\frac{3.07}{5.714}=53.73$
硅 Si	26.00	$\frac{26.00}{28.1}=0.92$	$\frac{0.92}{5.714}=16.10$
铝 Al	7.45	$\frac{7.45}{27}=0.31$	$\frac{0.31}{5.714}=5.43$
铁 Fe	4.20	$\frac{4.20}{55.05}=0.075$	$\frac{0.075}{5.714}=1.31$
钙 Ca	3.25	$\frac{3.25}{40.08}=0.081$	$\frac{0.081}{5.714}=1.42$
钠 Na	2.40	$\frac{2.40}{22.99}=0.10$	$\frac{0.10}{5.714}=1.75$
钾 K	2.35	$\frac{2.35}{39.1}=0.06$	$\frac{0.06}{5.714}=1.05$
镁 Mg	2.35	$\frac{2.35}{24.31}=0.096$	$\frac{0.096}{5.714}=1.68$
钛 Ti	0.61	$\frac{0.61}{48}=0.012$	$\frac{0.012}{5.714}=0.21$
氢 H	1.00	$\frac{1.00}{1.01}=0.98$	$\frac{0.98}{5.714}=17.15$
		5.714	

(表 2.2.1 仅是说明从重量克拉克值转换成原子克拉克值的计算方法。严格来讲应把全部元素均纳入进行换算,而此表仅列出 10 种元素,故所得计算结果不很确切。)

造成克拉克值高低不同的根本因素在于原子的化学性质,特别是原子核的稳定性,当原子核内的中子数与质子数比例适当时,核较稳定,具有最稳定的原子核的元素一般分布最广。如在原子序数小于 20 的轻核中,中子(z)/质子(p)=1,核最稳定,故 $8O^{16}$、$12Mg^{24}$、$14Si^{28}$、$20Ca^{40}$分布最广。当随着 z 的增大,核内质子间的斥力大于核力,核子的结合能降低,原子核不稳定,所以元素分布量随原子序数增大而减少,偶数元素与偶数同位素的核子倾向成对,自旋力矩相等,而方向相反,量子力学证明:这种核的稳定性最大,因而在自然界一般分布较广。

从地壳中所进行的各种化学作用来看,各种元素所起的作用,是与各元素相对的原子数目密切相关的。根据有关资料统计,就已知的矿物种数而言,大致与原子克拉克值成正比关系,即原子克拉克值大的元素,其所结合而成的矿物种数就多,如表 2.2.2 所列。

这是由于地壳中那些原子数量多的元素,在元素不断迁移过程中结合成矿物的可能性要比原子数量少者机会来得多,这样就可以大量地形成由这些元素结合而成的矿物。但是对于某些元素上述关系是不存在的,例如碲(Te)的原子克拉克值比硒(Se)的小 100 倍,但在自然界碲将近有 40 种独立矿物出现,硒却只有 28 种已知矿物,并大多是与硫化合的。锌(Zn)的原子克拉克值比铅(Pb)大 50 倍,但锌只有 26 种矿物而铅却将近有 130 种矿物。这种情况的出现,是因为矿物的形成不仅与原子的相对数量有关,而更主要的还决定于元素本身的性质。

表 2.2.2 元素的原子克拉克值与矿物种数的关系

元素	原子克拉克值(%)	矿物种数	元素	原子克拉克值(%)	矿物种数
O	53.37	1221	Fe	1.31	170
H	17.25	798	K	1.05	43
Si	16.11	377	C	0.51	194
Al	4.8	268	Ti	0.22	30
Na	1.82	100	Ce	0.10	67
Mg	1.74	105	F	0.07	50
Ca	1.41	194			

由于各种元素本身性质不同，它们在地壳中的分布也就有所不同。有些元素分布趋向于集中，可形成独立的矿物，甚至形成矿床，这类元素称为富集元素。另外一些元素分布则趋向于分散，难以形成独立的矿物，常以微量的混入物赋存于主要由其他元素组成的矿物中，前者如 Sb、Bi、Hg、Ag、Au 的克拉克值极低，但它们可以形成独立的矿物种，并且可以富集成矿床。后者如 Rb、Cs、Ga、Sc 等元素的克拉克值远比前者为高，但不易聚集成矿床，甚至很少能形成独立的矿物，这种状况是由于元素本身各种性质所决定的，主要包括有熔点、沸点、离子及原子半径、原子价、溶解度、电离势等，如表 2.2.3 所列。

表 2.2.3 富集元素及分散元素的特性

元素性质	富集元素	分散元素
熔点及沸点	高	低
离子及原子半径	中等的到小的	极端数值(很大或很小)，小者多形成挥发的封闭晶格，大者易溶解，易起水化作用
原子价	中等，并多数是偶数 2 或 4	低，主要是奇数的(1 或 3)
电离势	中等	低
溶解性	难	易
原子容积	小	大

一般是熔点、沸点高，离子及原子半径、原子价、电离势中等，溶解度低的元素，易于形成独立矿物，因为熔点、沸点高，溶解度低可使它们的化合物在溶液中结晶以后有较大的稳定性，具有中等的半径和化合物，可使其迁移过程中与其他元素化合时有广泛适应性。熔点、沸点低，离子及原子半径极大或极小，原子价和电离势低，溶解度大，则往往分散到其他矿物中去，较难以形成化合物而呈独立的矿物出现。

另外，若是元素性质相同、离子的构造和大小相似，而在同一溶液或熔体中的浓度不同，当结晶时，自然浓度小的元素会进入浓度较大的元素的结晶格子中，仿佛溶在它里面一样；若一元素在周围无离子构造和大小与之类似的元素，那么结晶时，不管在溶液中的含量是多么小，它都会形成独立的化合物。

2.2 元素的离子类型

元素在矿物中的结合，主要取决于元素本身与原子外电子层有关的性质。各种元素的原子得到电子的能力(电负性)和失去电子的能力(电离势)以及它们成为离子后的性质，包括离子的电子层结构(离子类型)、离子半径等，都是支配元素之间能否结合形成化合物的重要因素。元素之间化合时，离子的外电子层以2、8或18个电子的结构最稳定，各种元素都有力图使自己达到这种结构的趋势。一些元素之所以结合形成矿物，正是通过彼此间以得失电子的方式来满足各自的要求的。根据离子的最外电子层结构，可将离子分为三种基本类型。

表 2.2.4 元素的离子类型

He	Li	Be												B	C	N	O	F
Ne	Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl
						3a			3b									
Ar	K	Ca	Sc		Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Kr	Rb	Sr	Y		Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Xe	Cs	Ba	TR	①	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
Rn	Fr	Ra	Ac	①														
						3a			3b					4				
1	2																	

① TR与Ac分别为稀土族及锕族元素

1—惰性气体原子；2—惰性气体型离子；3—过渡型的离子；3a—亲氧性强；3b—亲硫性强；4—铜型离子

1. 惰性气体型离子

周期表左边的碱金属和碱土金属以及一些非金属元素的原子，失去或得到一定数目的电子成为离子时，其最外电子层结构与惰性气体原子的最外电子层结构相似，具有8个(s^2p^6)或2个(s^2)电子，称为惰性气体型离子。碱金属和碱土金属原子的电离势较低，容易失去电子变成阳离子，而非金属元素(主要是氧和卤素元素)的电负性较高，容易接受电子而变成阴离子。氧是地壳中含量最多、分布最广的元素，极易接受两个电子变成O^{2-}而达到稳定的外电子壳层。所以它们极易与氧结合生成氧化物和含氧盐(主要是硅酸盐)，形成大部分造岩矿物。因此，地质上常将这部分元素称为造岩元素，也称亲石元素或亲氧元素。碱金属和碱土金属元素的离子半径较大，极化性能较低，与氧和卤素元素形成以离子键为主的化合物。

2. 铜型离子

周期表长周期右半部的有色金属和重金属元素，失去电子成为阳离子时，其最外电子层具有18(或18+2)个电子，与一价铜离子($s^2p^6d^{10}$)相似，称为铜型离子。本类离子的离子半径较小，外层电子又多，极化性能很强，易与半径较大、又易被极化的S^{2-}结合生成以共价键为主的化合物，形成主要的金属矿物。因此将这部分元素称为造矿元素，也称为亲硫元素或亲铜元素。

3. 过渡型离子

周期表上Ⅲ—Ⅶ族的副族元素，失去电子成为阳离子时，其最外电子层为具有8～18个电子的过渡型结构，所以称为过渡型离子，在周期表上也居于惰性气体型离子与铜型离子之间的

过渡位置。它们的离子半径和极化性质也介于惰性气体型离子与铜型离子之间。外电子层的电子数愈近于8者亲氧性愈强(3a),易形成氧化物和含氧盐;愈近于18者亲硫性愈强(3b),易形成硫化物;居于中间位置的Mn和Fe,则与氧和硫均能结合。

离子的结合还受着所处的环境的影响。如W本来有与氧结合的倾向,但当介质中硫的浓度很大时,也可与硫结合。铜型离子只有在还原条件下即硫成负价时才能与之结合形成硫化物;在氧化环境中,硫成六价阳离子构成$[SO_4]^{2-}$,此时铜型离子则与氧结合生成氧化物及含氧盐。

过渡型离子如Fe和Mn究竟同哪种元素结合也受介质条件支配。在还原条件下多与硫结合生成黄铁矿或白铁矿(FeS_2)、硫锰矿(MnS);当氧的浓度很高时,便与氧结合生成赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、菱铁矿($FeCO_3$)、软锰矿(MnO_2)、菱锰矿($MnCO_3$)等。

2.3 矿物的化学组成类型

矿物是各种地质作用中,化学元素按照一定规律相互结合而成的。它可由一种元素组成,亦可以由两种或几种元素组成。因此,根据矿物中元素的组合情况,矿物的化学组成类型可分为单质和化合物两种类型。

1. 单质

由同种元素的原子组成的矿物称单质矿物。如金刚石C、自然金Au、自然银Ag、硫黄S等。元素主要以原子状态存在,是原子自相结合而成,这类型矿物也叫自然元素矿物。

2. 化合物

由两种或两种以上不同元素的原子、离子或络离子等组成的矿物称化合物矿物。

①简单化合物　由一种阳离子和一种阴离子(或络阴离子)组成的化合物,如食盐NaCl、方铅矿PbS、方解石$Ca[CO_3]$、硬石膏$Ca[SO_4]$、石英SiO_2等。

②复杂化合物　由两种或两种以上的阳离子和络阴离子组成的化合物。如高岭石$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$、钾长石$K[AlSi_3O_8]$、滑石$Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$、叶蜡石$Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$等。

2.4 胶体矿物的成分

1. 胶体矿物的概念

胶体是一种物质的微粒(1.0～100nm)分散在另一种物质之中所形成的不均匀的细分散系。前者称为分散相(或分散质),后者称为分散媒(或分散介质)。无论是固体、液体或气体,都既可以是分散相,也可以作为分散媒。

胶体与真溶液、悬浊液均可叫做分散系,它们之间的区别在于分散质点的大小不同,见表2.2.5。

真溶液是一种稳定的溶液,是分散程度最高的溶液,其中分布的物质已被粉碎到分子或离子的程度,此分子和离子均匀地分散在水中,在这种情况下,整个溶液只是一个相,如果温度、压力不变,水分不蒸发,无论置放多久,这种溶液不发生沉淀,如NaCl溶解在水里是以单个离子(Na^+和Cl^-)均匀地分散在水中。

表 2.2.5　三种分散系质点界限

分散系	分散质点的大小(以 Å 计)		质点的性质
悬浊液(粗分散系)	>1000	分散程度增加↓	普通显微镜可见
胶体(细分散系)	10～1000		超倍显微镜可见
真溶液	<10		

悬浊液是由很多固态或液态的小颗粒悬浮在水里形成的，是一种浑浊的液体，这些小颗粒是大量分子的集合体，集合体其颗粒直径大于 1000Å，置放时间长久后，这些颗粒便会沉淀下来。分散相为固体的叫悬浊液，分散相为液体的则为乳浊液。

胶体中分散相的质点大小是介于真溶液和悬浊液之间，为 10～1000Å，它是由较多的分子、原子或离子聚集而成，在一个胶体料子中可含有几个、几十个到几百个该化合物的分子或原子、离子(但比浊液中少得多)，但在普通显微镜下不能识别，自然界容易形成胶体元素有 Si、Al、Fe、Mn、P、S、C 等。

2. 胶体分散系统的分类

①根据分散媒及分散相的性质

分散相可以是固体、液体、气体，在矿物中以固体为主。分散媒也可以是固体、液体、气体，在矿物中以液体——水为主，除气体与气体不能组成胶体系统外，可以有 8 种不同类型的组合，如表 2.2.6 所列。

表 2.2.6　胶体系统不同类型组合

分散媒	分散相	例　　子
气体	固体	煤烟
气体	液体	雾
液体	固体	泥浆
液体	气体	硫化氢汞、泡沫
液体	液体	石油中的水、乳剂(如牛奶)
固体	液体	蛋白石中的水、自然硫晶体中的液态沥青
固体	固体	含有氧化铁细微质点的红色方解石
固体	气体	含有气体的乳白色矿物(如石英)

②根据分散媒及分散相的量比(相对含量)可分为：

胶溶体，分散媒远多于分散相的胶体系统，称胶溶体。在胶溶体中，分散相质点是呈悬浮状态存在于分散媒中，并且被分散媒分隔开来，肉眼观察好像完全是均匀的，亦称胶体溶液或假溶液。

胶凝体，分散相远多于分散媒的胶体系统，称胶凝体或凝胶。由于分散相的质点(胶体粒子)数量很多，以致各个质点好像彼此粘着在一起，似肉冻状、浆糊状，分散媒仿佛只占有分散质点之间所留下的剩余空隙，如矿物中的蛋白石即为二氧化硅的胶凝体。

③胶溶体和胶凝体根据其分散媒的性质又可分为：

水胶溶体和水胶凝体，其分散媒为水；气胶溶体和气胶凝体，其分散媒为气体；熔融胶溶体

和熔融胶凝体，其分散媒为某种熔融物；结晶胶溶体和结晶胶凝体，其分散媒为某种结晶质。

地壳中分布最广的是水胶溶体和水胶凝体，此外结晶胶溶体在矿物中也很普遍，结晶胶溶体通常都作为晶体来对待，而将分散于其中的分散相看成是包含于晶体中的机械混入物，因此胶体矿物实际上是指水胶凝体矿物。

3. 胶体溶液的形成

胶体矿物是由胶体溶液形成，而自然界中胶体溶液的形成有分散法和凝聚法。

地壳在长期的风化作用（主要是 CO_2、H_2O、O_2 等的作用）下，岩石和矿物经常发生崩裂和破坏，而风、流水、冰川等的动力作用，更使崩裂和破坏了的大小不等的岩石或矿物碎屑不断地进行机械摩擦，从而更趋于细小，为 10～1000Å 的细分散系的形成提供了物质基础，这是地壳中胶体生成的分散法。

凝聚法是指由于各种化学反应——氧化、还原，特别是置换分解作用等，引起分子凝聚到胶体质点的大小，在水中形成胶体溶液。

此外，生物作用（生物化学作用）在地壳最外层的胶体的形成中，也具有重要的意义。

4. 胶体溶液的特性

关于胶体的各种性质，在胶体化学中已有详述（如丁释尔效应、布朗运动等等）。这里所要介绍的是有关胶体质点的两种性质。

①表面积大

表面积是随着物质分散程度的增高而大大增加的，例如表 2.2.7 所列。

表 2.2.7 立方体粒子分散时表面积的变化

立方体边长(cm)	立方体数	总表面积	比面积(cm^{-1})
1	1	$6cm^2$	6
1×10^{-1}(1mm)	10^3	$60cm^2$	6×10
1×10^{-2}(0.1mm)	10^6	$600cm^2$	6×10^2
1×10^{-3}(0.01mm)	10^9	$6000cm^2$	6×10^3
1×10^{-4}(1μm)	10^{12}	$6m^2$	6×10^4
1×10^{-5}(0.1μm)	10^{15}	$60m^2$	6×10^5
1×10^{-6}(0.01μm)	10^{18}	$600m^2$	6×10^6
1×10^{-7}(1nm)	10^{21}	$6000m^2$	6×10^7

* 比面积即为单位体积的物体所具有的表面积。

由表 2.2.7 中可知，边长越小，表面积越大，即物体的分散度大，则表面积也越大，如 $1cm^3$ 的颗粒破碎到边长为 1nm 大小时，颗粒数目达 10^{21} 个，其表面积由 $6cm^2$ 增加到 $6000m^2$。

对悬浊液来说，分散的程度不及胶体，总表面积增加的倍数也较小，假如分割到每个小粒子都是 1 个分子，这样的分散系统就成为溶液，它是单相的，当然就谈不上粒子的表面积了，因此，一定体积的物质被分散到胶体粒子那样大小时，具有巨大的表面积，这是胶体的特征之一。

由于胶体体系具有巨大的表面积，因而也具有很大的表面自由能。为了降低表面自由能，一种途径是使胶体粒子合并，使表面积减少，另一种途径则是吸附其他物质，结果在胶体粒子核的周围形成一个双离子层（即扩散双电层）。

②胶体质点带电性及吸附作用

胶体溶液中的无数胶体质点（胶核）凭借着它们的广大表面从溶液中吸附带有正或负电荷

的离子，成为带电的粒子。

我们知道胶核本身是微晶质的，它内部的阴、阳离子有规则地排列。但是处于表面的离子和内部的离子，由于位置的不同，因而能量也不同，内部的离子受到四周的异电离子的吸引力，这些吸引力是对称的、均匀的，因而是相等的，彼此互相抵消，电价处于中和状态。而表面上的离子所承受的吸引力则是不对称的、不均匀的，因而是不饱和的，有剩余电价存在。这种剩余电价的存在，表现为表面的离子具有过剩的能量，也即具有表面自由能，能从溶液中吸附与晶格中离子相同或相似的离子到表面上来，因此使胶体成为带有电荷的粒子。

例如 AgBr 胶体粒子，虽然这种质点很小，要用超倍显微镜才能看见，但它们仍具有结晶构造，它具有 NaCl 结构，如图 2.2.1 所示。

从图中可以看出：位于胶体粒子内部的 Ag^+ 和 Br^-，它们的电价都与周围的异号离子达到平衡，但是，位于胶体粒子表面的离子，就具有未饱和的电价，于是，这些剩余电荷将从胶体溶液中吸附一定数量的补充离子 Br^-（这是当溶液中 Br^- 有多余时，如果是溶液中 Ag^+ 有多余的话，则吸附 Ag^+），因此，在胶体粒子周围形成一个 Br^- 离子层，并使整个胶体粒子带负电荷，此时，为了达到电荷平衡，它还要吸附存在于溶液中的其他阳离子，从而在 Br^- 离子层外又形成一个阳离子层构成了双离子层，这就是胶体吸附作用，它又是胶体的一个很重要的特性。

从胶体粒子带电的情况可知：由于在同一溶液中，同样的胶核只能吸附同种离子（正的或负的），因此，它们都带有相同符号的电荷，根据同性相斥的原理，这些带电的胶粒就不会由于彼此碰撞而结合为更大的粒子，也就是说还会沉降下来。这是溶胶能够在一段长时间内保持稳定的主要原因。

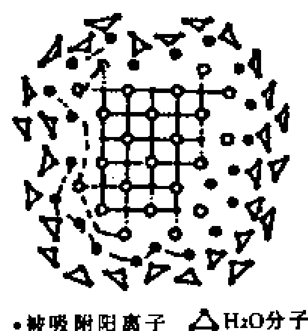


图 2.2.1 AgBr 胶体粒子的结构

胶体质点带有电荷，对胶体中不同性质的质点所带的电荷符号是不同的，在一定的分散媒中，同种胶体的所有胶体粒子所带的电荷符号是相同的，但是，同种胶体粒子在不同的分散媒中，所带的电荷符号就不一定相同，同时电荷符号还决定于介质的反应，在酸性介质中的电荷符号，通常和在碱性介质中的电荷符号相反。

自然界的胶体，根据其所带电荷的正、负不同可以分为正胶体和负胶体。地壳中常见的正胶体和负胶体见表 2.2.8。

表 2.2.8 自然界常见的正、负溶胶

正溶胶		负溶胶	
$Al(OH)_3$	$Tn(OH)_4$	SiO_2	Au、Ag、Pt、S
$Fe(OH)_3$	$Ce(OH)_4$	MnO_2	PbS CuS
$Cr(OH)_3$	$Cd(OH)_3$	SnO_2	CdS As_2S_3
$Ti(OH)_3$	$CaCO_3$	V_2O_5	Sb_2S_3
$Zr(OH)_4$	$MgCO_3$	粘土质胶体	
$Ge(OH)_4$	CaF_2	腐殖质胶体	

自然界中负胶体比正胶体分布广泛得多，有时氢氧化铁也带有负电荷。

由于正、负胶体的吸附作用，而使胶体矿物成分复杂化了，它表现在所吸附物质的种类和数量的不同上，而且变化范围是比较大的。不过，许多胶体的吸附作用往往是有选择性的，它们只吸附一定的某些物质，而对其他物质完全不吸附或吸附很少。所以胶体矿物化学组成的可变范围也并不是漫无边际的。如 MnO_2 负胶体吸附 Ba^{2+}、Li^+、K^+ 等离子，粘土质点负胶体吸附 K^+ 等，褐铁矿能吸附 $[PO_4]^{3-}$、$[VO_4]^{3-}$ 等。

胶体的吸附作用还能使一些粘土矿物中的成分与介质中的成分发生离子交换，例如胶岭石能把其成分中的 Ca、Mg 与介质中的 Ni 交换而使胶岭石中含有相当数量的 Ni，粘土矿物中 K 含量常常大于 Na 也与离子交换有关。

不同的元素被粘土的吸附难易程度也有不同，如两价阳离子被胶岭石吸附的顺序为 Pb＞Cu＞Ca＞Ba＞Mg＞Hg，而被高岭石吸附的顺序则为 Hg＞Cu＞Pb。

由于胶体作用所吸附的外来质点并不加入矿物的晶格，因此不能把它们算在矿物的化学成分中，但在某些场合下，它却很不容易和矿物本身的成分区别开来，需用 X 射线法或电子显微镜法才可精确地测定胶体的成分。

5. 胶体矿物的形成和变化

①胶体矿物的形成

形成矿物的胶体主要是水胶溶体，这里仅简单介绍矿物从水胶溶体变为胶凝体的过程，即形成胶体矿物的过程。

在地壳表面广泛分布着水胶溶体，它是一种处于准稳定状态的胶体溶液，其胶体质点带有电荷，当条件改变时，即当带有相反电荷的胶粒与之互相中和(或蒸发作用)而失去电荷时，水胶溶体就会互相凝聚并逐渐固结，而成为胶凝体亦称为胶体矿物。这种使水胶溶体形成胶凝体的作用称为凝结作用或胶凝作用。常见的胶体矿物有蛋白石($SiO_2 \cdot nH_2O$)及水针铁矿($HFeO_2 \cdot nH_2O$)。

胶体质点失去电荷的原因是多方面的，其中最普遍的原因是在胶体溶液内存在着带有不同电荷的胶体粒子以及在同一胶体溶液中存在着符号相反的离子所致。如 $Fe(OH)_3$ 正溶胶和 SiO_2 负溶胶相遇，就会形成含有胶体二氧化硅的褐铁矿。正或负溶胶和异号离子互相作用引起凝结现象通常是通过加入大量电解质来实现，如带有 $Fe(OH)_3$ 正溶胶的河流，当其在出口处与海水相遇，由于海水中含有大量的 Na^+、Mg^{2+}、Cl^- 等离子，此时 Cl^- 就和 $Fe(OH)_3$ 胶粒所吸附的 FeO^+ 互相作用而中和，使胶粒失去电荷，众多的 $Fe(OH)_3$ 便互相凝结在一起形成褐铁矿，进而失水变为赤铁矿，有些滨海或滨湖地带形成的鲕状赤铁矿和上述成因有关，江河入海处的河口上形成的三角洲，也是河水中带电的砂粒被海水中大量的异电离子聚沉的结果。

引起胶体凝聚的因素，除胶体的电荷中和以外，其他如溶胶的干枯、冻结和温度升高，生物的活动，放射性射线的影响等等，也都可以引起胶体的凝结。

经由胶体作用所形成的矿物广泛地存在于地表，因此表生矿物化学成分的变化主要在于胶体的吸附，但根据一些学者的见解，在热水溶液甚至岩浆成矿作用中，部分矿物也是从胶体溶液中生成的。

②胶体矿物的变化(即凝胶体的变化)

胶凝体是胶溶体通过凝结作用而形成的，因此，胶凝体中总含有或多或少的水，它们随着时间的推移，逐渐地会失去水分，硬度增高，内部结构也随之改变，即由毫无排列规律的胶体质

点趋向于规律的排列，由非晶质逐渐转变为稳晶质，然后再转变为显晶质状态，这一转变过程称为胶体的陈化，或胶凝收缩作用。在陈化过程中，胶体的体积发生收缩，形成特殊的裂缝，当强烈失水时，表面还会发生干裂纹。

这种由凝胶体经过陈化作用而生成的结晶质矿物叫做变胶体矿物（亦称偏胶体矿物），例如蛋白石 $SiO_2 \cdot nH_2O$ 是由 SiO_2 负溶胶经凝结作用而成的胶凝体矿物，而石髓、燧石、玛瑙、碧石等则是变胶体矿物，表 2.2.9 是自然界中一些胶体矿物及与之相当的变胶体矿物的例子。

表 2.2.9　自然界中一些胶体矿物和变胶体矿物

胶凝体矿物	变胶体矿物
蛋白石：$SiO_2 \cdot nH_2O$	石髓、燧石、玛瑙，SiO_2
水质硫铁矿：$FeS \cdot H_2O$	白铁矿、黄铁矿 FeS_2
褐铁矿：$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$	针铁矿　$Fe_2O_3 \cdot H_2O$ 赤铁矿　Fe_2O_3
土硅铜矿（硅孔雀石之胶状类似物）$CuSiO_3 \cdot nH_2O$	硅孔雀石 $CuSiO_3 \cdot 2H_2O$

胶体的陈化除了时间的因素以外，温度、压力和气候等也有重要的关系，温度和压力的增加及干燥炎热的气候有利于陈化作用的进行。

6. 胶体矿物的形态构造和成分的特点

从形态上看，胶体矿物不具有规则的几何多面体形态，常常呈鲕状、肾状、葡萄状、钟乳状、结核状和皮壳状等，表面有裂缝或皱纹。

从结晶状态而言，可以是非晶质的，也可以是隐晶质的或显晶质的，这取决于胶体是否陈化和陈化的程度，由于胶体外部周期性的沉积和内部不均匀的扩散，致使胶体成因矿物经常具有同心层状或带状构造，如像玛瑙中的色环就是由于带色物质在胶凝体中不均匀的扩散，造成程度上的差别（一处缺少，一处过饱和），在失水变成变胶体矿物过程中残留下来的。此外胶体在陈化过程中，晶体的个体常以同心层作为生长基底，在垂直方向上生成，因而呈纤维放射状构造。

从化学成分上看，除含有较多的水外，化学成分不固定是胶体矿物的一个重要特点，化学成分的不固定一方面表现在分散相与分散媒含量比的差异上，同时还表现在所吸附物质的种类和数量的不同上，而这些被吸附的离子在很大程度上极难与矿物本身的成分分开，因而造成了成分上的极不固定，不能用比较简单的化学式表示出来，这种在胶体矿物中常有其他元素共存的特点，在找矿实践上具有重要意义。

2.5　矿物中的水

在很多矿物中，水起着重要作用。水是很多矿物的一种重要组成部分，矿物的许多性质与其含水有关。

根据矿物中水的存在形式以及它们在晶体结构中的作用，可以把水分为两类：一类是不参加晶格，与矿物晶体结构无关的，统称为吸附水；另一类是参加晶格或与矿物晶体结构密切相关的，包括结晶水、沸石水、层间水和结构水。

①吸附水　不参加晶格的吸附水是渗入在矿物集合体中，为矿物颗粒或裂隙表面机械吸

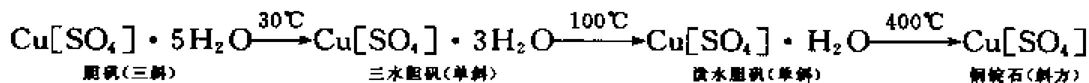
附的中性的 H_2O 分子。吸附水不属于矿物的化学成分，不写入化学式。它们在矿物中的含量不定，随温度和湿度而不同。常压下，温度达到 100～110℃时吸附水就全部从矿物中逸出而不破坏晶格。吸附水可以呈气态、液态或固态。

含在水胶凝体中的胶体水，作为分散媒被微弱的联结力固着在胶体的分散相的表面，这是吸附水的一种特殊类型。胶体水是胶体矿物固有的特征，应计入矿物的化学组成，但其含量变化很大，如蛋白石 $SiO_2 \cdot nH_2O$（n 表示 H_2O 分子数量，含量不固定）。

②结晶水　以中性分子存在于矿物中，在晶格中具有固定的位置，起着构造单位的作用，是矿物化学组成的一部分。水分子的数量与矿物的其他成分之间常成简单比例。

结晶水往往出现于具有大半径络阴离子的含氧盐矿物中，如石膏 $Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$、胆矾 $Cu[SO_4] \cdot 5H_2O$ 等。某些矿物中的结晶水以一定的配位形式围绕着阳离子（有时也围绕着阴离子）如六水硫镍矿 $Ni[SO_4] \cdot 6H_2O$ 中，因 Ni^{2+} 的离子半径(0.077nm)很小，与$[SO_4]^{2-}$的半径相差很大，不能形成稳定的晶格，因此由 6 个水分子包围了 Ni^{2+}，形成水化阳离子 $[Ni(H_2O)_6]^{2+}$ 以增大半径，再与$[SO_4]^{2-}$形成稳定的晶格。

不同矿物中，结晶水与晶格联系的牢固程度是不同的，因此其逸出温度也有所不同。由表 2.2.10 可见，结晶水从矿物中逸出温度一般不超过 600℃，通常为 100～200℃。当结晶水失去时，晶体的结构遭到破坏和重建，形成新的结构。例如常温下的芒硝 $Na_2[SO_4] \cdot 10H_2O$ 在 33℃以上时，结晶水全部逸出而变成无水芒硝 $Na_2[SO_4]$。此外，同一矿物中的结晶水与晶格联系的牢固程度也常不同，水的逸出往往表现为分阶段的、跳跃式的，并有固定的温度与之适应。如：



$$Cu[SO_4] \cdot 5H_2O \xrightarrow{30℃} Cu[SO_4] \cdot 3H_2O \xrightarrow{100℃} Cu[SO_4] \cdot H_2O \xrightarrow{400℃} Cu[SO_4]$$

胆矾(三斜)　　三水胆矾(单斜)　　一水胆矾(单斜)　　铜靛石(斜方)

随着水的逸出，晶格被改造、重建，矿物一系列的性质均相应的变化。由此可见，含结晶水的矿物，其失水温度和某一温度间隔内的失水量是一定的。借此可帮助人们了解矿物的形成温度及作为鉴定矿物的标志之一。

表 2.2.10　几种含结晶水矿物的失水温度

矿物名称	化学式	放出水时的温度
苏　打	$Na_2[CO_3] \cdot 10H_2O$	常温下
石　膏	$Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$	100～120℃
水方硼石	$CaMg[B_6O_{11}] \cdot 6H_2O$	200～325℃
硼钠钙石	$NaCa[B_5O_9] \cdot 8H_2O$	115～500℃
透视石	$Cu[SiO_3] \cdot H_2O$	200～600℃

③沸石水　是存在沸石族矿物中的中性水分子。沸石的结构中有大的空洞及孔道，水就占据在这些空洞和孔道中，位置不十分固定。水的含量随温度和湿度而变化。加热至 80～400℃范围内，水即大量逸出，但不引起晶格的破坏，只引起物理性质（如比密度、折射率、透明度等）的变化。脱水后的沸石仍能重新吸水，恢复原有的物理性质。可见沸石水具有一定的吸附水的性质，但其存在与结构有关，含量的变化有一定的上限和下限范围。

④层间水　是存在于某些层状结构硅酸盐的结构层之间的中性水分子。如蒙脱石中，水分子亦联结成层，并杂有交换性的阳离子 Na^+、Ca^{2+} 等，水的含量多少受交换阳离子的种类和

环境、温度、湿度的控制。加热至110℃时，层间水大量逸出，结构层间距相应缩小，晶胞轴长 c_0 值减小，矿物的相对密度和折射率都增高，在潮湿环境中又可重新吸水。可见，层间水也具有一定的吸附水性质。

⑤结构水　又称化合水。是以 $(OH)^-$、H^+、$(H_3O)^+$ 离子形式参加矿物晶格的"水"，如高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$、天然碱 $Na_3H[CO_3]_2 \cdot 2H_2O$ 和水云母 $(K,H_3O)Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 中，但以 $(OH)^-$ 形式最为常见。结构水在晶格中占有固定的位置，在组成上具有确定的含量比。由于与其他质点有较强的键力联系，需要较高的温度(大约在600～1000℃之间)才能逸出。当其逸出后，结构完全破坏，晶体结构重新改组。

矿物中含有各种不同形式的水，同一种矿物中也可以存在几种不同形式的水。研究水在矿物中存在形式的最好方法是热分析法，同时也可用红外吸收光谱、X射线衍射、电子衍射和中子衍射配合进行。

2.6　矿物的化学式及其计算

矿物的化学式是表达矿物化学成分的方式，它对于矿物的分类，区别各矿物的变种，对于了解元素在矿物晶格中的赋存状态，了解矿物成分、结构与形态、物性的关系，甚至推断形成条件等均有一定的意义。

矿物化学式的表示方法有两种：即实验式和构造式。

1. 实验式

实验式仅表示矿物中组成元素种类及其原子数之比，它有两种表示方法。

①用元素的形式表示

如简单的化合物：PbS(方铅矿)、$BaSO_4$(重晶石)以及较复杂的化合物 $Be_3Al_2Si_6O_{18}$(绿柱石)、$KAlSi_3O_8$(正长石)、$H_2KAl_3Si_3O_{12}$(白云母)、$H_4Al_2Si_2O_9$(高岭石)。

②用元素的简单氧化物组合形式表示

如绿柱石　$3BeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$；

正长石　$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$；

白云母　$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$

高岭石　$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$

实验式的优点是形式简洁，在配平化学反应方程式时经常使用，缺点是不能反映矿物组分之间的关系及构造特点。

2. 构造式

构造式亦名结构式，它除了表示出实验式所包含的内容外，还能反映出离子或原子在晶体结构中的相互关系。

目前在矿物学中普遍采用的是"晶体化学式"(或称结构式)。这种化学式既表明矿物中各组分的种类，又能反映矿物中原子结合的情况。晶体化学式的书写方法如下：

①阳离子写在化学式的开始，在复盐中的阳离子要按碱性的强弱顺序排列。

②阴离子接着写在阳离子的后面，络阴离子则要用方括号"[　]"括起来。

③附加阴离子通常写在主要阴离子或络阴离子的后面(也有写在主要阴离子前面的)。

④含水化合物的水分子写在化学式的最后面，并用圆点"·"把它与矿物中的其他组分分

开。当含水量不定时，常用 nH_2O 或 aq(aqua——含水的缩写)表示。如蛋白石 $SiO_2 \cdot nH_2O$ 或 $SiO_2 \cdot aq$。

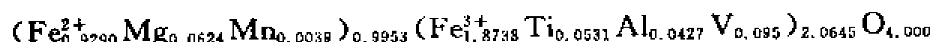
⑤互为类质同象代替的离子用圆括号“（　）”括起来，它们中间以逗号“，”分开，含量较多的元素一般写在前面。

例如：白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$　　高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$

石膏 $Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$　　橄榄石 $(Fe,Mg)[SiO_4]$

铁白云石 $Ca(Mg,Fe,Mn)[CO_3]_2$　　铁闪锌矿 $(Zn,Fe)S$

有时为了更详尽地表示出矿物的化学成分，还要说明离子的电价（对于变价离子）和相互代替的离子数目，此时各元素符号之后不再加逗号。如我国某地一种磁铁矿的晶体化学式为：



$$(Fe^{2+}_{0.9290}Mg_{0.0624}Mn_{0.0039})_{0.9953}(Fe^{3+}_{1.8738}Ti_{0.0531}Al_{0.0427}V_{0.095})_{2.0645}O_{4.000}$$

化学式是根据矿物的化学全分析计算出来的，所分析的矿物样品应有一定纯度。如果分析数据中仍有少量杂质，则应在计算时予以扣除；如果不明确是否系杂质，则在计算时，权作类质同象组分参加计算。矿物的化学全分析的结果一般用元素含量百分比或氧化物含量百分比给出。供化学式计算的分析值，其合计总量偏离 100%时(应在 99.50%～100.50%范围内，否则不能用)，应将总量改算成 100%，再用经修正后的各组分值进行计算。现将矿物化学式的计算方法举例说明：

例 1　我国所产某黄铁矿化学式计算（数据见表 2.2.11）。

表 2.2.11　某黄铁矿化学式计算数据

组分	质量(%)	修正后质量(%)	原子量	原子数	原子数比率
S	53.41	53.65	32.06	1.6734	2
Fe	46.11	46.32	55.84	0.8295	0.9914
Co	0.021	0.021	58.93	0.0004	0.0005
Ni	0.009	0.009	58.71	0.0002	0.0002
合计	99.55	100.00			

(1)将化学全分析结果按合计总量为 100%进行改算；

(2)以修正后的各元素质量百分比除以原子量求得原子数；

(3)根据黄铁矿的已知一般化学式 FeS_2，设 S 的原子数为 2，相应地求出其他元素的原子数比率(如 $Co = 0.0004 \div \frac{1.6734}{2} = 0.0005$)；

(4)根据元素晶体化学性质判断 Co、Ni 与 Fe 为类质同象关系，则此黄铁矿的晶体化学式为：



$$(Fe_{0.9914}Co_{0.0005}Ni_{0.0002})_{0.9921}S_2$$

例 2　我国某钠长石的化学全分析和晶体化学式的计算(数据见表 2.2.12)。

(1)化学全分析结果各组分以氧化物质量百分数表示，并在总量中扣除不纯物质和烧失量(b 项)；

(2)以总量为 100%换算出的各组分质量百分数(c 项)；

(3)求出各组分的分子量(d 项)；

(4)各组分的百分含量除以分子量求出分子数(c/d)(e 项)；

表 2.2.12　某钠长石化学分析及晶体化学式计算数据

a	b	c	d	e	f	g	h	i
组分	质量%	修正后质量%	分子量	分子数	氧原子数 ×10000	阳离子元素的原子数 ×10000	氧原子为 8 时氧原子数比	氧原子为 8 时阳离子元素的原子数比
SiO_2	67.63	68.06	60.09	1.1326	22652	11326	5.9497	2.9749
Al_2O_3	19.92	20.05	101.94	0.1967	5901	3934	1.5469	1.0333
Fe_2O_3	0.15							
CaO	0.25	0.25	56.08	0.0045	45	45	0.0118	0.0118
Na_2O	11.24	11.31	61.98	0.1825	1825	3650	0.4794	0.9587
K_2O	0.33	0.33	94.20	0.0035	35	70	0.0092	0.0184
TiO_2	0.03							
烧失量	0.33							
合计	99.88	100.00			30458		8	
去烧失量	0.33							
去 Fe_2O_3	0.15							
去 TiO_2	0.03							
	99.37							

(5)根据分子数求出氧原子数(×10000)(f 项)；

(6)根据分子数求出阳离子元素的原子数(×10000)(g 项)；

(7)已知钠长石一般晶体化学式 $Na[AlSi_3O_8]$中氧原子数为 8，氧原子数总和为 30458，除以 8 则得 3807.25，再以此值分别去除各组分的氧原子数(f 项)和阳离子元素的原子数(g 项)求出氧原子为 8 时各组分的氧原子数比(h 项)和阳离子元素的原子数比(i 项)；

(8)根据上述计算结果列出该钠长石的晶体化学式为：



$$(Na_{0.9587}K_{0.0184}Ca_{0.0118})_{0.9889}[Al_{1.0333}Si_{2.9749}O_8]$$

上述两个计算实例，都是已知矿物化学式的通式，以成分中含量比较固定的阴离子元素的原子数为基础进行计算的。对于含(OH)、F、Cl 等附加阴离子的矿物，计算时还必须对氧进行校正。此外，针对一些成分特殊的矿物，还有一些其他计算方法。以给定阳离子元素的原子数为基础的计算方法，系认为矿物中阳离子的数目是比较固定的，而选定矿物晶格中电价高、配位数低、半径小、含量相对较稳定的阴离子的原子数为基础来进行计算的，例如在含结构水的矿物中，由于结构水在矿物中可能有多种存在形式(如 OH^-、H_3O^+、H_2O 等)，不宜以给定氧原子数值来进行计算，当矿物通式不详，在测定了晶胞参数、相对密度及化学组成后，可以直接计算单位晶胞中氧离子数目，再计算矿物的化学式。用这种方法，还可以由单位晶胞的分子量与矿物最简化学式的分子量求得单位晶胞中的分子数。对于含水矿物及变晶质矿物，有一些专门的计算方法，这里不作叙述。

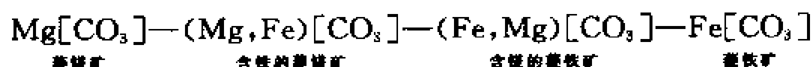
2.7　类质同象

以上诸节我们探讨了一定的化学成分和晶体结构的关系，本节我们进一步阐述当化学成分发生规律变化时的情况。

1. 类质同象的概念

晶体结构中某种质点(原子、离子或分子)为它种类似的质点所代替,仅使晶格常数发生不大的变化,而结构型式并不改变,这种现象称为类质同象。

例如在菱镁矿 $Mg[CO_3]$和菱铁矿 $Fe[CO_3]$之间,由于镁和铁可以互相代替,可以形成各种 Mg、Fe 含量不同的类质同象混合物(混晶)。从而可以构成一个镁、铁成各种比值的连续的类质同象系列,如:



在这个系列中矿物的结构型相同,只是晶格常数略有变化。

又如,闪锌矿 ZnS 中的锌,可部分地(不超过 26%)被铁所代替,在这种情况下,铁被称为类质同象混入物,富铁的闪锌矿被称为铁闪锌矿。铁代替锌可使闪锌矿的晶胞参数(a_0)增大。

类质同象混合物是一种固溶体。所谓固溶体是指在固态条件下,一种组分溶于另一种组分之中而形成的均匀的固体。它可以通过质点的代替而形成"代替固溶体"(即类质同象混晶),也可以通过某种质点侵入它种质点的晶格空隙而形成"侵入固溶体"。

类质同象是指质点的相互代替,它不能与两种晶体具有相同的晶形或两种晶体具有等同的结构型式(等型结构)相混淆,在后两种情况下,并不一定存在着类质同象的代替关系。

在类质同象混晶中,若 A、B 两种质点可以任意比例相互取代,则称为完全的类质同象。它们可以形成一个连续的类质同象系列,如上述菱镁矿—菱铁矿系列中镁、铁之间的代替。若 A、B 两种质点的相互代替局限在一个有限的范围内,则称为不完全的类质同象,它们不能形成连续的系列,如上述闪锌矿((Zn,Fe)S)中,铁取代锌局限在一定的范围之内。

根据相互取代的质点的电价相同或不同,分别称为等价的类质同象和异价的类质同象。前者如上述的 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 之间的代替;后者如在钠长石 $Na[AlSi_3O_8]$与钙长石 $Ca[Al_2Si_2O_8]$系列中,Na^+和 Ca^{2+}之间的代替以及 Si^{4+}和 Al^{3+}之间的代替都是异价的,但由于这两种代替同时进行,代替前后总电价是平衡的。

2. 形成类质同象的条件

形成类质同象代替的原因一方面取决于代替质点本身的性质,如原子离子半径大小、电价离子类型、化学键性等;另一方面也取决于外部条件,如形成代替时的温度、压力、介质条件等。兹分别阐述如下。

①原子和离子半径

相互取代的原子或离子,其半径应当相近。戈德施米特(V. M. Goldschmidt)和格瑞姆(H. G. Grimm)指出:当两种质点(原子、离子或分子)的半径不超过较小质点的 15%时,就可以在晶体结构中相互代替。索波列夫(B. C. Соблев)指出:在电价和离子类型相同的情况下,离子在晶体结构中的类质同象代替能力随着半径差别的增大而减小。若以 r_1 和 r_2 分别代表较大和较小的离子的半径,则:

a)当$(r_1-r_2)/r_2<10\%\sim15\%$时,一般形成完全的类质同象替代;

b)当$(r_1-r_2)/r_2$ 在 10%到 20%~25%的范围时,在高温下形成完全类质同象,温度下降时,固溶体发生离溶;

c)当$(r_1-r_2)/r_2>25\%\sim40\%$时,即使在高温下也只能形成不完全的类质同象,而在低温下则不能形成类质同象。

在异价类质同象的情况下，类质同象代替的能力主要取决于电荷的平衡，而离子半径的大小退居于次要地位。因此对于异价类质同象替代，离子半径的限制不起决定性的作用。如在斜长石中，Al^{3+}可代替Si^{4+}，而$(r_{Al}^{3+}-r_{Si}^{4+})/r_{Si}^{4+}$值(=(0.039−0.026)/0.026)却高达50%。

在元素周期表中，从左上方到右下方的对角线方向，离子半径相近；一般右下方的高价离子易代替其左上方的低价离子，从而形成离子对角线法则（见表2.2.13）。

表2.2.13 异价类质同象代替的对角线法则

（表中的数据为离子有效半径，单位为nm；括号中的数字表示配位数）

Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Li 0.076(6) 0.092(8)						
Na 0.102(6) 0.118(8)	Mg 0.072(6) 0.089(8)	Al 0.039(4) 0.054(6)				
K 0.138(6) 0.151(8)	Ca 0.100(6) 0.112(8)	Sc 0.075(6) 0.087(8)	Ti 0.061(6) 0.074(8)			
Rb 0.152(6) 0.161(8)	Sr 0.118(6) 0.126(8)	Y 0.090(6) 0.102(8)	Zr 0.072(6) 0.084(8)	Nb 0.064(6) 0.074(8)	Mo 0.059(6) 0.073(7)	
Cs 0.167(6) 0.174(8)	Ba 0.135(6) 0.142(8)	TR 0.086-0.103(6) 0.098-0.116(8)	Hf 0.071(6) 0.083(8)	Ta 0.064(6) 0.074(8)	W 0.060(6)	Re 0.053(6)

②总电价平衡

在类质同象的代替中，必须保持总电价的平衡。在使总电价平衡的前提下，类质同象的代替可以有不同的方式。

a)简单的代替　如$Mg[CO_3]$—$Fe[CO_3]$中的Mg^{2+}和Fe^{2+}的代替。

b)成对的代替　可以是异价阳离子之间成对的代替，如在斜长石$Na[AlSi_3O_8]$—$Ca[Al_2Si_2O_8]$系列中$Na^{+}+Si^{4+}\longrightarrow Ca^{2+}+Al^{3+}$，或如在磷灰石$(Ca^{2+},Ce^{3+},Na^{+})_5$，$[PO_4]_3F$中的$Ce^{3+}+Na^{+}\rightarrow 2Ca^{2+}$；也可以异价阳、阴离子相配合成对地代替，如在独居石$(Ce,La,Th,Ca)[(P,Si,S)O_4]$中$(Ce,La)^{3+}+[PO_4]^{3-}$，$Th^{4+}+[SiO_4]^{4-}$和$Ca^{2+}+[SO_4]^{2-}$之间的代替。

c)不等量的代替　可以是以较少的高价阳离子代替较多的低价阳离子，如在云母中Mg^{2+}、Al^{3+}间以$2Al^{3+}\longrightarrow 3Mg^{2+}$方式代替；也可以较多的低价阳离子代替较少的高价阳离子，如同样在云母中，也可以$3Mg^{2+}\longrightarrow 2Al^{3+}$的方式进行代替；亦可是带有附加离子的代替，如在萤石(CaF_2)中可出现$Ca^{2+}\longrightarrow Y^{3+}+F^{-}$方式的代替，又如在绿柱石$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$中有$Li^{+}+Cs^{+}\longrightarrow Be^{2+}$式的代替。

③离子类型和化学键

惰性气体型离子在化合物中一般为离子键结合，它们常见于卤化物、氧化物和含氧盐中；

而铜型离子在化合物中以共价键结合为主,它们常见于硫化物中。离子类型不同,化学键不同,则它们之间的类质同象代替就不易实现。如六次配位的 Ca^{2+} 和 Hg^{2+} 的半径分别为 0.100nm 和 0.102nm,电价相同,半径相近,但由于离子类型不同,所以它们之间一般不出现类质同象替代。与此相反,Al^{3+} 和 Si^{4+} 均为惰性气体型离子,它们的半径差值比[$(r_{Al}^{3+}-r_{Si}^{4+})/r_{Si}^{4+}=(0.039-0.026)/0.026=50\%$]很大;但在斜长石中它们分别呈 Al^{+++} 和 Si^{++++},状态相似,均与 O^{--} 形成半离子键半共价键的结合,且 Si—O 与 Al—O 间距分别为 0.161nm 和 0.176nm,两者较为接近,从而使 Al^{3+} 可代替 Si^{4+}(四面体配位)。同样的原因,由于铝在低温形成的铝土矿中呈 Al^{3+} 状态,所以可被易成 Ga^{3+} 状态的镓所代替。

④温度

温度增高有利于类质同象的产生,而温度降低则将限制类质同象的范围并促使离溶。如在高温下碱性长石中的 K、Na 可以相互成类质同象替代形成(K,Na)[$AlSi_3O_8$]或(Na,K)[$AlSi_3O_8$],温度降低则发生离溶形成钾长石 K[$AlSi_3O_8$]和钠长石 Na[$AlSi_3O_8$]两物相组成的条纹长石。又如黄铜矿 $CuFeS_2$ 和黝锡矿 Cu_2FeSnS_4,它们在500℃以上形成类质同象混合晶体,低于500℃时则发生离溶。赤铁矿 Fe_2O_3 与钛铁矿 $FeTiO_3$ 的固溶体在低于675℃时发生离溶;镍黄铁矿 $(Fe,Ni)_9S_8$ 与磁黄铁矿 $Fe_{1-x}S$ 的固溶体在低于420~450℃时离溶。

一般来说,低温条件下形成的矿物成分比较纯净。

⑤压力

一般来说,压力的增大将限制类质同象代替的范围并促使其离溶,但这一问题尚待进一步的研究。

⑥组分浓度

一种矿物晶体,其组成组分间有一定的量比。当它从熔体或溶液中结晶时,介质中该组分若不能与上述量比相适应,即某种组分不足时,则将有与之类似的组分以类质同象的方式混入晶格加以补偿。例如磷灰石的化学式为 $Ca_5[PO_5]_3F$,从岩浆熔体中形成磷灰石要求熔体中的 CaO 和 P_2O_5 等的浓度符合一定的比例,若 P_2O_5 浓度较大,而 CaO 的浓度相对不足,则 Sr、Ce 等元素就可以类质同象的方式补偿、代替 Ca 进入磷灰石的晶格,因而磷灰石中常可聚集相当数量的稀有分散元素。又如磁铁矿 $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ 中 $Fe^{2+}:Fe^{3+}=1:2$,当岩浆中 $FeO:Fe_2O_3>1:2$,即 Fe_2O_3 的浓度过小,而 V_2O_3、Ti_2O_3 的浓度又较大时,则后者进入晶格,形成钒钛磁铁矿 $Fe^{2+}(Fe^{3+},V,Ti)_2O_4$。

3. 类质同象物质的分解(固溶体离溶)

如前所述,温度的下降和压力的增大可以促使类质同象的分解而产生离溶。被分离出来的晶体常受到主晶体结构的控制而在主晶体中成定向排列。

氧化还原电位的变化也是使类质同象分解的一个因素。若固溶体中类质同象混入物是变价元素,则当氧化电位增高时,该元素将从低价状态转变为高价状态,同时阳离子半径缩小,因而原矿物的晶格发生破坏,混入物就从原矿物中析出。例如 Fe、Mn 在内生成矿作用中主要呈二价离子彼此成类质同象代替。但在外生条件下,则被氧化为高价离子 Fe^{3+}、Mn^{4+},因而从晶格中析离,不但形成独立的矿物,而且在有利条件下还可以形成巨大矿床。同样 Cr、V 在内生成矿作用中主要呈三价离子,与 Fe^{3+}、Ti^{3+} 互相代替;但在外生条件下即转变为高价离子 Cr^{6+}、V^{5+},因而与 Fe、Mn、Ti 分离,而与氧结合成络离子$[CrO_4]^{2-}$、$[VO_4]^{3-}$形成铬酸盐与钒酸盐矿物。

硫化物在氧化过程中可以从原来的原子晶格转为典型的离子晶格，因而元素的结合关系发生改变，类质同象混入物就将从原矿物中分离出来。黝铜矿、闪锌矿等在氧化时均有许多元素分离出来。

类质同象混入物的分解具有重大的实际意义。因为这种分解有时能造成某些元素的集中，这种集中过程在外生作用中表现得特别明显。例如超基性岩中所含的类质同象混入物氧化和分离的结果有时形成铁、锰和镍、钴的次生矿床。此外，掌握类质同象混合物分解的知识对于了解矿床氧化带和原生矿床的关系，从而对进一步寻找原生矿床有很大帮助。

4. 研究类质同象的实际意义

类质同象是矿物中一个极为普遍的现象，它是引起矿物化学成分变化的一个主要原因。地壳中有许多元素本身很少或根本不形成独立矿物，而主要是以类质同象混入物的形式赋存于一定的矿物的晶格中。例如 Re 经常赋存于辉钼矿中，Cd、In、Ga 经常存在于闪锌矿中。类质同象的研究有助于阐明矿床中元素赋存状态、寻找稀有分散元素、进行矿床的综合评价。同时由于类质同象的形成与矿物的生成条件有关，因而类质同象的研究有助于了解成矿环境。如闪锌矿中铁含量的变化，反映了矿物形成程度的变化。

类质同象代替所引起的矿物化学成分的规律变化，必然会导致矿物的一系列物理性质（如颜色、光泽、条痕、折光率、比密度、硬度、熔点等等）的规律变化，系统地研究这些规律变化的相互关系就可以使我们根据矿物物性的测定来确定矿物组分的变化。

2.8 同质多象

1. 同质多象的概念

同种化学成分的物质，在不同的物理化学条件（温度、压力、介质）下，形成不同结构的晶体的现象，称为同质多象。这些不同结构的晶体，称为该成分的同质多象变体。

例如金刚石和石墨就是碳（C）的两个同质多象变体，它们的晶体结构如图 2.2.2 所示，表 2.2.14 列出了它们的某些对比。

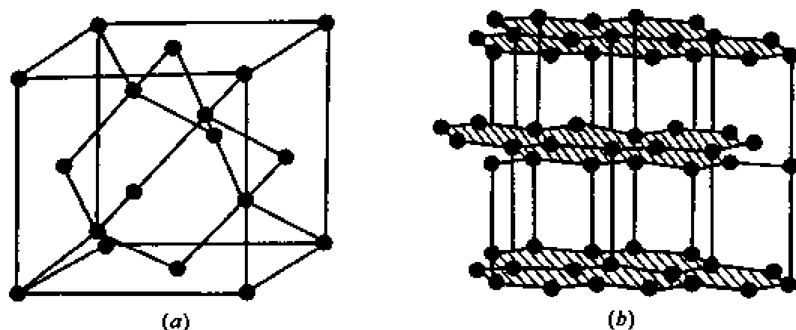


图 2.2.2　金刚石(*a*)和石墨(*b*)的结构

同质多象的每一个种变体都有它一定的热力学稳定范围，都各具备自己特有的形态和物理性质。因此，在矿物学中它们都是独立的矿物种。

同种物质的同质多象变体，常根据它们的形成温度从低到高在其名称或成分之前冠以 α-、β-、γ-等希腊字母，以资区别，如 α-石英、β-石英等。

表 2.2.14 金刚石和石墨的对比

	金刚石	石　墨
晶　系	等轴晶系	六方晶系
空间群	$Fd3m$	$p6_3/mmc$
配位数	4	3
原子间距	0.154nm	层内 0.142nm，层间 0.340nm
键　性	共价键	层内共价键，层间分子键
形　态	八面体	六方片状
颜　色	无色或浅色	黑色
透明度	透明	不透明
光　泽	金刚光泽	金属光泽
解　理	//{111}中等	//{0001}完全
硬　度	10	1
相对密度	3.55	2.23
导电性	不良导体	良导体

2. 同质多象变体的转变

同质多象各变体之间，由于物理化学条件的改变，在固态条件下可发生相互的转变。同质多象变体间的转变温度在一定压力下是固定的，但转变的速度随温度下降而急速降低，因此，我们在常温下可以看到许多不稳定变体，它标志着其形成时的温度。所以在自然界的矿物中某种变体的存在或某种转化过程可以帮助我们推测该矿物所存在的地质体的形成温度。因此，它们被称为“地质温度计”。表 2.2.15 列出了某些矿物同质多象转变的温度。对于同一物质而言高温变体的对称程度较高。

表 2.2.15 某些矿物同质多象转变的温度

矿物同质多象变体	成分	晶系	转变温度
α-石英 β-石英	SiO_2	三方 六方	573℃
α-鳞石英 β-白硅石	SiO_2	六方 等轴	1470℃
硅灰石 假硅灰石	$Ca_3[Si_3O_9]$	三斜 假六方	1190℃
闪锌矿 纤维锌矿	ZnS	等轴 六方	1020℃
辉铜矿 等轴辉铜矿	Cu_2S	斜方 等轴	91～105℃
螺状硫银矿 辉银矿	Ag_2S	斜方 等轴	170℃

压力的变化对同质多象的转变有很大的影响。例如，从表 2.2.16 可以看出，在不同的压力下(相当于地下不同的深度)，α-石英$\rightleftharpoons$β-石英的转变温度会发生很大的变化。一般说来，温度的增高促使同质多象向配位数减少、比重降低的变体方向转变；而压力的作用却正好相反。例如，利用石墨制造金刚石，即须在极高的压力(5 万个以上的大气压)下进行。

表 2.2.16 不同压力(相当于地下不同深度)下 α-石英⇌β-石英的转变温度

压力(10^5 Pa)	1	250	1250	2500	3000	5000	7500	9000
相当于地下深度(km)	0	1	5	10	12	20	30	36
α-石英⇌β-石英转变温度(℃)	573.0	580.3	601.6	626.2	644.0	681.5	734.5	832.0

介质的成分、杂质以及酸碱度等对同质多象变体的形成也会产生影响。如 FeS_2 在相同的温度和压力下，在碱性介质中生成黄铁矿(等轴)，而在酸性介质中生成白铁矿(斜方)；在地表条件下，在基性岩的风化壳上 $CaCO_3$ 易生成文石(斜方)，在其他场合 $CaCO_3$ 则生成方解石，而 Sr 的存在可促使文石结构的稳定。此外，杂质的存在还可以影响到同质多象转变温度，如表 2.2.15 所列的闪锌矿与纤维锌矿，当成分中含 Fe 达 17%时，同质多象转变温度可降至 880℃。

同质多象的转变，又可分为可逆的(双向的)和不可逆的(单向的)两种类型。如 α-石英⇌β-石英的转变在 573℃时瞬时完成，而且可逆；$CaCO_3$ 的斜方变体文石在升温条件下转变为三方变体方解石，但温度降低则不再形成文石。

同质多象转变从变体的晶体结构的变化来看，存在着移位型转变(一变体转变为另一变体时，结构中仅发生质点位置稍有移动，键角有所改变等不大的变化)、重建型转变(结构发生了根本性变化，相当于重建结构)和有序—无序转变(后有详述)。

同质多象转变的难易，一般与变体间结构的差异程度有关。差异愈大，转变愈难，且往往是不可逆的。

同质多象转变在自然界是较为常见的，由于它们与外界条件(温度、压力、介质等)密切相关，因此可以用来推测地质体形成时的外界条件。

3 矿物的形态

矿物的形态是矿物的外貌特征，由于矿物可呈单个晶体和连生晶体以及集合体的形式出现，因而矿物的形态可以分为：单体形态、连生体形态和集合体形态。在自然界，矿物多数呈集合体出现，但是发育较好的具有几何多面体形状的晶体也不少见。

矿物形态是其成分、内部结构的外在反映。具一定成分和内部结构的矿物具有一定的晶体形态特征，从而可将形态作为识别矿物的一种依据，在矿物鉴定上具有重要的意义，另外，矿物形态也受外部生成环境的影响，在不同的物理化学条件下生成的同种矿物，在形态上常表现出一定的差异，故形态既可作为了解矿物形成时条件的依据之一，又具有成因上的意义。

3.1 矿物的单体形态

矿物的单体形态是指矿物的单个晶体的形态。矿物单体形态的研究包括：晶体形状、晶体习性、晶体大小和晶面花纹等等。

1. 晶体形状

晶体形状是以结晶学上所述 47 种单形为基础的，以及由单形相聚所组成的聚形（详细内容参看结晶学部分第 4 章）。

实际晶体都是非理想的，可以偏离理想形态，根据其晶形的完整程度，大致可分为三种情况，如图 2.3.1 所示。

①自形晶　晶形发育良好，有较完整的晶面（图 2.3.1(*a*)）。

②半自形晶　只有少数的晶面发育。

③他形晶　成不规则的外形。

半自形晶及他形晶的晶体形态则常为歪晶等非理想形态，主要原因是矿物在结晶时，受空间条件的影响。自形程度好的是先结晶的，因为它有充足的时间，各晶面可以得到自由的发展，而以后结晶的只好填充在剩下的空间内，形成半自形和他形晶，我们可以利用这种关系来判断不同矿物结晶的先后次序。

2. 晶体习性

晶体习性是指在相同生长条件下形成的同种晶体所具有的常见形态。

有些矿物的晶体习性是相当稳定的，如尖晶石、黄铁矿等，但多数矿物晶体具有多种习性，如方解石、磷灰石、绿柱石、长石等。

根据单晶体在空间三个相互垂直方向上发育的相对程度不同，即相对比例的不同，可将晶体习性大致分成三类。

①一向延伸类型　晶体沿一个方向特别发育，包括柱状、针状等，前者如绿柱石、α-石英；后者如钠沸石、硅灰石等（图 2.3.2(*a*)）。

②二向延展类型　晶体沿两个方向特别发育，包括板状、片状等，前者如板钛矿、重晶石等，后者如石墨、云母等（图 2.3.2(*c*)）。

③三向等长类型　晶体沿三个方向大致相等发育呈粒状，如石榴子石、黄铁矿等(图2.3.2(b))。

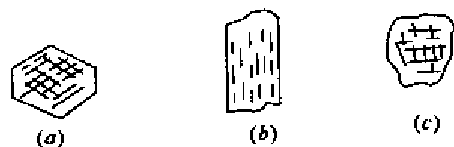


图 2.3.1　晶形的完整程度

(a) 自形晶；(b) 半自形晶；(c) 他形晶

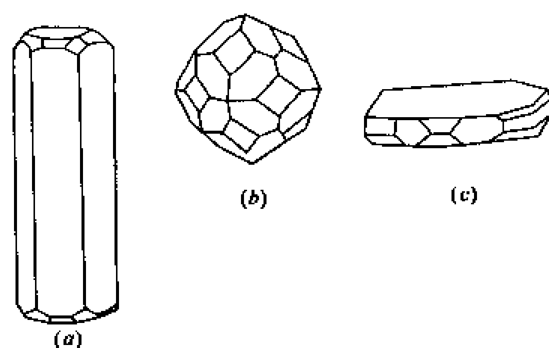


图 2.3.2　矿物晶体习性的基本类型

(a) 一向延伸类型(绿柱石、柱状)；

(b) 三向等长类型(石榴子石、粒状)；

(c) 二向延展类型(板钛矿、板状)

以上是三种基本的类型，在它们之间也没有截然的界线，还可以存在过渡类型，例如介于柱和板之间，则成短柱状或厚板状等。同时，上述分类是相对的，且是粗略的，每一类的伸缩性很大，还可再作进一步的描述，如柱状，可以是纤维状、长柱状或短柱状等，又如板状晶体可以是厚板状、薄板状等。总之，自然界晶体形态多种多样，在描述晶体的习性时，要从实际情况出发。

晶体的习性主要决定于晶体内部构造，如层状构造的晶体多是二向延展类型，链状构造的晶体常是一向延伸型，架状构造的晶体常是三向等长型。

晶体的习性明显地受到晶体对称性的制约，等轴晶系的晶体通常均属于三向等长型；中级晶族晶体通常是沿 Z 轴延伸或垂直 Z 轴延展，在少数情况下也可能是近于三向等长；低级晶族晶体中通常是沿某一结晶轴延伸或平行某二结晶轴延展的一向延伸、二向延展类型，或是近于三向等长。

另外，生长环境的外在因素对晶体习性的影响也起着重大的作用，这方面内容参看结晶学第 2 章论述。

总之，晶体习性既取决于晶体的内部结构因素，同时也受到晶体生长过程中外部因素的控制，是它们相互作用的综合结果。

3. 晶体大小

矿物晶体的大小变化很大，从直径数米的到显微镜难以区别的均有。

3.2　矿物的集合体形态

同种矿物多个单体聚在一起的整体就叫做矿物集合体，矿物多数是以集合体状态出现。其集合体形态千姿万态，丰富多彩，主要取决于矿物单体的形态特征和它们之间的排列方式，如放射状集合体，它的单体必须是具有一向延伸的形态，其相互之间的排列是以一点为中心而排列。

研究矿物集合体的形态特征，不仅在矿物鉴定及矿物成因研究上有很大意义，而且矿物集合体中的颗粒大小和它们的相互关系等等的研究对选矿、技术加工方面也有一定参考价值。

根据集合体中矿物颗粒大小(或可辨度)可分为以下三种集合形态：

①显晶集合体形态——肉眼可以辨认单体。

②隐晶集合体形态——显微镜下才能辨认单体。

③胶态集合体形态——在显微镜下也不能辨认单体。

3.2.1 显晶集合体形态

按照矿物个体习性的不同有以下几种常见的类型：

1. 个体呈一向延伸的集合体形态

①柱状集合体　由许多柱状矿物单体集合而成，如辉锑矿柱状集合体(图 2.3.3)



图 2.3.3　辉锑矿的柱状集合体

②针状集合体　由细长的针状矿物组成的集合体，如钠沸石、电气石、金红石等。

③纤维状集合体　由一系列呈细长针状或纤维状的矿物单体延长方向相互平行密集排列所组成的集合体，如石棉(图 2.3.4)。

④束状集合体　针柱状矿物大致平行排列，一端略有收敛，另一端略有撒开或两端均略有撒开的集合体。

⑤放射状集合体　矿物单体呈长柱状或针状(少数情况下呈片状)的晶体，它们以一点为中心，向外呈放射状排列而成的集合体，如红柱石(图 2.3.5)。

⑥树枝状集合体　晶体生长时在某些方向迅速生长而成树枝状，如自然铜、自然金等。

⑦晶簇　在岩石的空洞或裂隙中，以洞壁或裂壁作为共同基底而生长的单晶体群所组成的集合体，它们一端固着于共同的基底上，另一端则自由发育而具有完好的晶形(图 2.3.6)。晶簇可以由单一的矿物组成，如常见的石英晶簇、方解石晶簇等，也可以由几种矿物共同组成，例如伟晶岩中的石英、长石等晶体的晶簇。对于一些呈一向延伸类型的晶体而言，在它们的晶簇中，由于受到几何淘汰律的制约，其中发育最好的晶体与基底近于垂直，不垂直于基底的晶体在生长过程中常常被淘汰，有时发育到最好，各单体的延长方向往往形成近于平行排列，构成所谓的梳状构造。

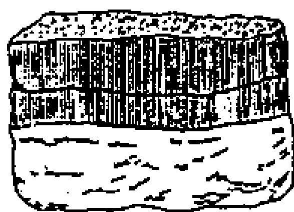


图 2.3.4　石棉的纤维状集合体

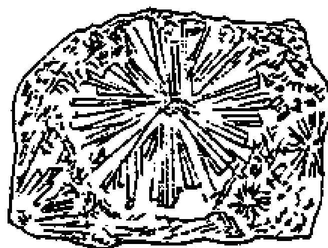


图 2.3.5　红柱石的放射状集合体



图 2.3.6　石英晶簇

晶簇中巨大而纯净的单晶体，如水晶、电气石、萤石、方解石等均是工业上贵重的材料。

2. 个体呈两向延展的集合体形态

根据单晶体的厚薄大小可分为：

①板状集合体　由板状矿物集合组成如重晶石、钠长石。

②片状集合体　由片状集合组成，如辉钼矿、云母。

③鳞片状集合体　由细小片状矿物集合组成，如绢云母、石墨。

3. 个体呈三向等长的集合体形态

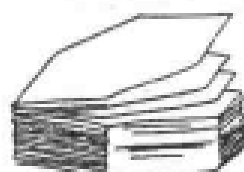
粒状集合体，由粒状矿物组成，如橄榄石、石榴子石等。粒状集合体按其颗粒大小的不同，一般可分为：

粗粒状集合体，粒径大于 5mm；

中粒状集合体，粒径 1～5mm；

细粒状集合体，粒径小于 1mm。

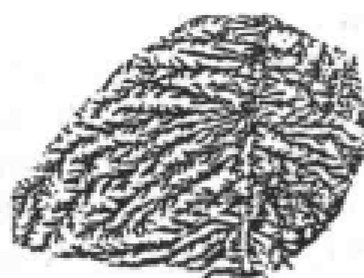

束状(针铁矿)

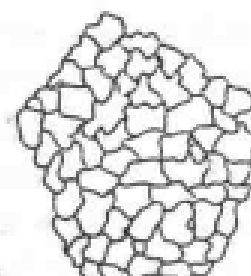

片状(云母)

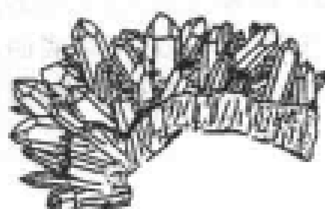

放射状(银星石)


柱状(辉锑矿)


纤维状(石棉)

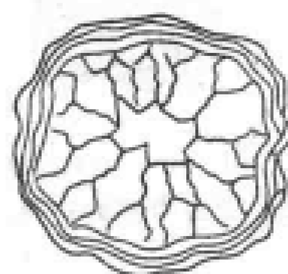

树枝(软锰矿)

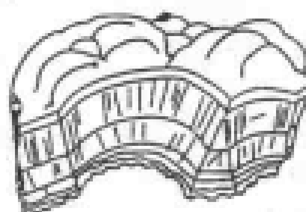

粒状(大理岩)


晶簇状(石英)


结核状(磷灰石)


鲕状(赤铁矿)


晶腺(玛瑙)


葡萄状(菱锌矿)

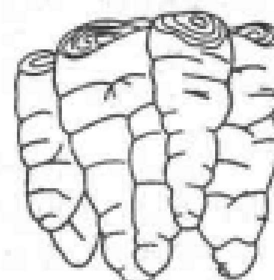

钟乳状(方解石)

图 2.3.7　矿物的集合体形态

3.2.2 隐晶及胶态集合体形态

这类集合体可以由溶液或熔体中直接结晶而成，也可以是胶体沉淀的矿物陈化而成。隐晶及胶态集合体按外表形态或成因又可划分如下类型：

①块状集合体　由毫无晶面出现的结晶物质组成不规则的块状。根据其致密和疏松的程度还可区分为：

致密块体，由均匀而细小的物质组成的致密块状。如燧石、黄铜矿。

土状块体，由均匀而细小的物质组成的疏松块状，是指一种柔软的粉末状的集合体，通常是由矿石或岩石经化学风化而成，呈土块状出现，典型的例子如高岭石。

肉冻状块体，具有水胶凝体矿物特征的块体。

②分泌体　由晶质或胶体物质自洞壁逐渐向中心充填于球状或不规则的空洞中(图 2.3.8)，分泌体的特点是多数的组成物质具有由外向内的同心层状构造，各层在成分和颜色上往往彼此不同而构成条带状色环，中心部分常未填满留有空腔，空腔周壁常见晶簇或钟乳状体嵌布。根据分泌体大小可分：



图 2.3.8　分泌体的生长程序

晶腺，大小在 2.5～30cm 或更大，某些胶体成因的矿物常具此种形态，例如，带状玛瑙(图 2.3.9)。

杏仁体，其大小一般在 1cm 以下，由充填于火山岩气孔中的次生矿物(方解石、沸石、葡萄石、石髓等)所构成，呈如同杏仁般的白色扁球形的矿物集合体，通常中心亦留有空腔(图 2.3.10)。



图 2.3.9　玛瑙的晶腺



图 2.3.10　方解石和沸石的杏仁体

③结核体　结核的形成过程正好与分泌体的形成过程相反，它是围绕某一中心自内向外逐渐生长而成的球状、凸镜状、瘤状或不规则状的矿物集合体(图 2.3.11)，组成结核体的物质可以是细晶质或胶体非晶质。它形成于致密岩石或疏松的沉积物之中，在风化壳和氧化带中也能产生结核体。其物质来源于围岩。

结核往往是胶体成因的，其内部常具有同心层状的构造，当胶体经过长时间的逐渐失水而陈化后，往往还可以看到有细长的晶体，从中心向外呈放射状排列而具放射状构造，例如黄铁矿的结核(图 2.3.12)等。但也有内部呈致密状的，如磷灰石结核等。

最常形成结核状的矿物有结核磷灰石、方解石、菱铁矿、褐铁矿、蛋白石、黄铁矿、白铁矿等。

结核体不但形状多样，而且大小极不一致，其直径可以从几毫米到几米，甚至更大。

结核按其内部构造和大小不同又可分为：

鲕状集合体：由许多如同鱼籽大小的圆球群所组成的矿物集合体，称为鲕状集合体。例如鲕状赤铁矿(图 2.3.13)，如果是像豌豆大小的则称为豆状集合体。它们具有同心层状构造，常是围绕某一物质(矿物晶体、砂粒、气泡等)颗粒为核心生长而成，各个鲕粒或豆粒之间通常



图 2.3.11 结核体的发育程序



图 2.3.12 黄铁矿结核

(a) 外形，面上可见晶化后形成的立方体晶面；

(b) 剖面，可见明显的放射状构造

都被同种成分的物质胶结在一起。

球状集合体：结核大于鲕状和豆状。其内部则具放射状构造，每一纤维相当于一向延伸的晶体，其一端汇集于球体的中心，这是由晶体形成过程中受几何淘汰律作用或分裂的结果。

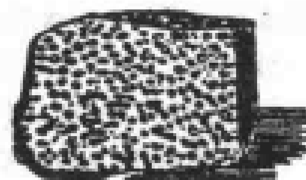


图 2.3.13 鲕状赤铁矿的鲕状集合体，具同心层状构造

④钟乳状体　由同一基底向外逐层生长而形成的圆锥状、圆柱状、半球形或腰子状的矿物集合体统称为钟乳状体。是由溶液或胶体因水分蒸发凝固而成，其内部常具有同心层状、放射状、致密状或结晶粒状构造，这是凝胶再结晶的结果。

钟乳状体一般存在于洞穴或裂隙之中，附着于洞穴顶部形成下垂状的钟乳状体称石钟乳，而在洞穴底部，由滴下溶液凝聚向上生长者称石笋，两者相连接时则成石柱，这些形态在石灰岩溶洞中构成琳琅满目的奇景。

根据形状不同，可将钟乳状体分为：

钟乳状集合体：通常呈圆锥形或圆柱状；

葡萄状集合体：外形呈许多相互连接的半球，形状如一串葡萄；

肾状集合体：外形上呈较大的半椭球体，好像一个个腰子似的；

钟乳状、葡萄状、肾状三者形态间可以是逐渐过渡的，钟乳状区别于它们的主要特点是，它们较长，通常呈圆锥形和圆柱形。

矿物集合体的形态，除以上叙述的以外，还可以列出一些，例如比针状更细的毛发状，粗细介于针状和柱状之间的棒状等等，以及在风化作用影响下形成的粉末状、被膜状（矿物呈粉末状散附或呈薄层覆盖于其他矿物或岩石的表面上）、烟灰状等。此外，还有一些不很常见，但对某矿物来讲是比较有特征的形态，例如沸石的禾束状，白铁矿的鸡冠状，文石的珊瑚状等等。

矿物的集合体形态千差万别，名称都是象形的，在此不再赘述。

4 矿物的物理性质

矿物的物理性质，在矿物学的发展过程中，就一直被人们所研究、所熟知，并根据它来识别矿物、利用矿物和寻找矿物资源，以及提供有关矿物成因探讨的依据。每种矿物都有它自己的物理特征，不同的矿物其物理性质均存在着差异性，所以对鉴定矿物来讲，除形态特征之外，物理性质是一个重要的依据。如刚玉(Al_2O_3)的高硬度可作为研磨材料和精密仪器的轴承，利用石英的压电性可作为现代国防、电子工业中的重要元件之一，以及云母的良好绝缘性、冰洲石的双折射均可为工业上甚至尖端技术所广泛地应用，矿物的磁性、导电性、放射性、比密度等性质可作为选矿、地球物理探矿以及找矿的重要依据。又如在不同的地质条件下所产生的同一种矿物，往往在物理性质上会有一些细微的差异，据此可推测矿物形成的条件，如闪锌矿(ZnS)形成时，如温度较高，介质中的铁质较多，则其颜色易呈黑色或褐黑色，条痕为褐色；如温度不高，介质中的铁质较少，则呈较浅的颜色(黄色、褐黄色等)，条痕黄白色。

矿物的物理性质主要取决于矿物本身的化学成分与内部结构。不同的矿物，由于其化学成分和内部结构不同固然具有不同的物理性质，但是不同成分的矿物，即使内部结构非常相似，物理性质仍可不同，如天青石和铅矾两矿物，它们晶体结构相似，物理性质如硬度、比密度均有差异，天青石硬度为 3～35，比密度为 3.971，铅矾硬度为 2.5～3，比密度为 6.323，另外成分相同的矿物，如果其结晶构造不同，则它们的物理性质也可不同。如金刚石和石墨两矿物，成分均是 C(碳)，但结构不同，因此其一系列物理性质(硬度、比密度、颜色、光泽、透明度等)相差均较大。

此外，由于一切晶体均具有结晶均一性、各向异性和对称性。这些性质，对于晶体矿物来说，在其物理性质上都有体现。

本章叙述的内容，主要偏重于肉眼或借助于简单的工具易于鉴别的物理性质，同时，并对某些与物理性质有密切关系的化学组成和晶体结构方面的因素，进行简要的阐述，以便能理解化学组成、晶体结构和物理性质之间的相互关系。此外，对影响矿物物理性质的某些外在因素，也作一些说明，以便为在今后鉴定矿物的工作中和与陶瓷原料有关矿物的研究中带来方便。

矿物的物理性质包括光学性质、力学性质、电学性质、热学性质及其他性质，现分述如下。

4.1 矿物的光学性质

矿物的光学性质应该是指各种波长的光线投射到矿物后所产生的性质，这些性质表现的方面很多，这里主要介绍矿物对可见光的吸收、折射和反射所表现的各种性质，它们有矿物的颜色、条痕、光泽、透明度等，现分别叙述如下。

4.1.1 矿物的颜色

矿物的颜色，是最直观最易于识别的一种现象，很多矿物具有它的特殊颜色，它对于鉴定矿物、寻找矿产都具有重要的意义，有时还可以帮助判别矿物的形成条件，同时也和矿物的命

名有密切关系。

从物理学的观点来讲，矿物的颜色是矿物对白光（可见光）中不同波长光波吸收的结果。白光其波长范围约介于7700～3900Å之间，从长波向短波方向，依次呈红、橙、黄、绿、蓝、青、紫七色，白光就是由这七种色光混合而成。如果矿物对各种波长的光波普遍而均匀地吸收时，随着吸引强度逐渐增加，则分别呈现为无色、白色、灰色、黑色（黑色为矿物对光波全部吸收时出现的颜色，当基本上不吸收时，则为无色或呈白色）。如果矿物对各种波长的光波有选择性地吸收，则呈现出被吸收颜色的补色来。如图2.4.1所示，如果我们把白光范围内不同波长的颜色，按图中那样分布，那么，任意一对对角扇形的两种颜色，当它们以相等的程度（浓度）混合后也呈现白色。这样的两种颜色我们称为互补色。例如当矿物吸收紫色光则呈现出黄绿色。

对于透明矿物，所透过光波的颜色就是该矿物的颜色，如自然硫是透明矿物，可概略地认为由于它较多地吸收了透射光波的紫、蓝、绿、橙、红色光波而透过较多的黄色光波故呈黄色。对于不透明矿物来说，它的颜色主要决定于其表面反射光波的颜色，如黄铁矿表面反射出来的是以黄光为主，则呈黄色。白色萤石、自然银等分别表现为对透射光波、反射光波普遍而均匀的吸收、反射而呈现出白色。

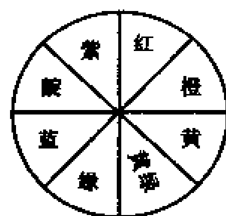


图2.4.1　互补色

根据矿物的颜色产生的原因可分为自色、他色和假色。

1. 自色

是矿物自身所固有的颜色，这种颜色是很稳定的，基本上不受外界条件的影响。自色对鉴定矿物有重要的意义，是该矿物不可分割的一种特征。如黄铜矿的铜黄色，孔雀石的翠绿色，方铅矿的铅灰色，磁铁矿的铁黑色等。

自色的产生，都与矿物本身的化学成分和内部结构直接有关。在不同的矿物中，自色产生原因也有所不同。根据研究，自色的产生与下列因素有关：

①由于矿物本身的组成成分中，含有某种色素离子，致使矿物呈色，这些色素离子可以是组成矿物的主要离子或离子团，也可以是类质同象的混入物，而绝不是外来的机械混入物。但某些一般不是色素离子的，在个别矿物中也能使矿物产生颜色，如铷(Rb)使天河石呈绿色，铯(Cs)使绿柱石呈玫瑰色。

最主要的色素离子是门捷列夫周期表中第四周期的钛(Ti)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)等；较为次要的是钨(W)、钼(Mo)、铀(U)、铜(Cu)及稀土元素。

常见的由各种色素离子所引起的主要矿物的颜色如表2.4.1所列。

色素离子引起呈色的原因是由于当色素离子处于结晶场中时，它的d轨道或f轨道就要发生晶体场分裂，从而形成不同的能级。这些不同能级之间的能量差，一般与可见光区内某个波长相对应，于是，当白光通过矿物时，矿物内电子吸收一定波长光波的能量后就会引起激发，即引起矿物内这些离子的d电子层或f电子层中发生电子跃迁。此种过程称为d-d跃迁或f-f跃迁。在此过程中，电子强烈吸收相应的特定波长的色光，从而使矿物呈现被吸收光颜色的补色，表现为矿物的颜色。例如钛辉石，它含有Ti^{3+}，在钛辉石结构的结晶场中，它的五个d轨道分裂为两组能量状态不同的轨道组，其间的能量差相当于波长为4900Å的绿光所具有的能量。当白光通过钛辉石时，引起Ti^{3+}离子中d层电子的跃迁，结果导致矿物强烈吸收绿色光而呈现紫色。

表 2.4.1 常见色素离子及有关矿物的颜色

色素	颜色	矿物举例	色素	颜色	矿物举例
Fe^{2+}	绿色	绿泥石	V^{5+}	黄红色	钒铅矿
Fe^{3+}	褐色	褐铁矿	V^{3+}	绿色	钒云母、辉石
	红色	赤铁矿	Cu^{2+}	绿色	孔雀石
Fe^{2+}、Fe^{3+}	蓝色	蓝铁矿		蓝色	蓝铜矿
	黑色	磁铁矿	Co^{3+}	玫瑰色	钴华
Ti^{4+}	红褐色、褐色	黑云母、榍石		蓝色	方镁石
Cr^{3+}	红色	刚玉		红色	镁橄榄石
	绿色	钙铬石榴石			
Mn^{4+}	黑色	软锰矿			
Mn^{2+}、Mn^{3+}	玫瑰色	红帘石			
Ni^{2+}	绿色	镍橄榄石			
	黄色	镍辉石			

②有些透明矿物也能产生颜色，这是由于其中的静电状态发生变化，这种离子受某种原因影响能变为中性原子或带微电荷的原子，致使晶格中的均一性遭受破坏，因而产生颜色，例如呈现美丽蓝色的石盐(NaCl)，是因为石盐中一部分离子，特别是钠离子吸取了电子后变为中性原子所致。若用人工方法，以金属钠蒸汽作用于透明的石盐，或以带有自由电子的阴极射线作用之，均可获得同样的结果。

③有很少数的矿物颜色，既不是由色素所引起，也不是由于静电均一性的破坏，而是由于在晶格内部的空隙中，存在有某种离子或离子团所造成。例如淡蓝色的方钠石 $Na_8[AlSiO_4]_6Cl$，由于有些氯离子存在于铝硅氧骨架的大空洞中，因而呈现蓝色。

以上所述矿物自色产生的原因，其中最普遍和最主要的是由于色素离子的存在而引起的呈色。

2. 他色

指矿物由于外来带色杂质的机械混入所染成的颜色，也可以是气、液包裹体的存在而引起的颜色。这些外来杂质或包裹体与矿物本身的成分结构无关，他色由于含有杂质不同而随之变化，故他色在矿物鉴定上意义不大，通常他色在无色、白色或浅色矿物中比较常见，例如无色透明的石英，由于不同杂质的混入，可使石英染成紫色(紫水晶)、玫瑰色(蔷薇石英)、烟灰色(烟水晶)、黑色(墨晶)等。

矿物的他色，有时可因加热而消失或改变，有时又可因经受 X 射线的照射而恢复原来的颜色或改变为其他的颜色。例如紫水晶在加热(240～270℃)时，其紫色就消失，变为黄色；萤石(CaF_2)的颜色在加热(175℃)时，可以失去，而经 X 射线照射后，则又可恢复。

矿物的他色，虽然在鉴定矿物时意义不太大，但对找矿可有一定的价值，根据实际观察，某些铀矿床中的伴生脉石矿物，由于受到铀的放射作用的影响，常常产生特有的他色。如方解石、白云石、长石呈红色，重晶石呈浅红色，石英呈烟色或紫色等。这些现象对找矿很有作用，值得注意。

3. 假色

指矿物的颜色，既不是由于本身性质所引起自色，也不是由于外来杂质机械的混入所引起

的他色，而是由于某些物理原因造成的与本质无关的颜色，按其性质不同，可分为下列几种：

①晕色　某些透明矿物的表面常常呈现出一种虹彩状的色彩称为晕色。如在白云母、方解石的解理面上最易看到。晕色的产生是由于照射到矿物表面的入射光受到矿物解理面或薄层包裹体表面的层层反射所造成的干涉现象的结果，因经过多次反射的缘故，晕色常呈现同心环状的色环。

②锖色　某些不透明矿物的表面，有时可见到色彩斑斓的薄膜称为锖色。锖色是由于矿物表面受到风化后产生的一层薄膜，覆盖在矿物表面，从而引起反射光的干涉作用的结果，例如斑铜矿的新鲜面上本是暗铜红色，由于表面氧化膜的影响，使其矿物表面上常具有紫蓝混杂的斑状色彩。

③变色　把某些矿物转动观察时，其表面可以呈现出不同颜色的变化称为变色。如拉长石在转动察看时，呈现出蓝、绿、黄、红等颜色。引起变色的原因多数是由于矿物内部有定向排列的微细叶片包裹物，引起光的干涉作用而造成的。

晶质矿物的颜色也可以是各向异性的，这是因为晶体中的不同方向，对光的选择性吸收可以是有差异的，晶体的颜色各向异性称为多色性。

矿物的颜色繁多、千差万别，描述时应力求确切、简明、通俗。如系两种颜色的混合色，可用双重命名法，如黄绿色、灰白色、褐红色等，在书写次序上，后面的颜色为主要，前面的为次要。如系同种颜色，而在色调上有深浅浓淡之分时，则用比较法。如深红、浅绿、淡黄等。如上述描述仍然不够确切时，还可用比拟法。如乳白、铁黑、草绿等。

为了更好地掌握矿物颜色的描述，通常利用标准色谱或实物对比的方法描述矿物的颜色。以下是几种标准的颜色及其代表矿物，可作为描述矿物颜色的基础。

红色——辰砂(粉末)　　靛蓝色——铜蓝

橙色——雄黄　　紫色——紫水晶

黄色——雌黄　　褐色——褐铁矿

绿色——孔雀石　　黑色——黑色电气石

蓝色——蓝铜石　　铅灰色——方铅矿

灰色——铝土矿　　铜红色——自然铜

白色——斜长石　　金黄色——自然金

在观察和描述矿物颜色时，应以矿物新鲜面颜色为准，如矿物表面风化很厉害，则需用小刀刮去表面的一层假色后才能进行观察。初学时，不易准确地辨别矿物的颜色，必须通过不断的对比练习，观察矿物颜色的细致差别，就能逐步掌握，用以很好地鉴定矿物。

4.1.2　矿物的条痕

矿物的条痕是矿物粉末的颜色，一般是指矿物在白色无釉瓷上划擦时所留下的粉末的颜色。

条痕是矿物呈粉末状态时对光线中不同波长光波吸收的结果。

条痕色由于它消除了假色，减弱了他色，因而一般比矿物颗粒的颜色更为固定，所以在鉴定矿物上有重要意义。如赤铁矿的颜色可以是铁黑色，也可以是红褐色，但其条痕总是樱红色。

矿物的条痕可以与其本身的颜色一致，也可以不一致，如磁铁矿的颜色及其条痕均呈黑

色，孔雀石的颜色及其条痕都是鲜绿色。方铅矿的颜色是铅灰色，条痕是黑色，黄铜矿的颜色为铜黄色，而条痕为绿黑色。

在某些矿物中，根据条痕的颜色，可推断其化学成分的变化。因为随着矿物成分的改变，条痕的颜色也将渐渐地有变化，例如不含铁的闪锌矿（ZnS），其条痕是从淡黄以至于近乎白色，而含铁的闪锌矿（Zn，Fe）S，则条痕呈深棕色。

条痕对于不透明矿物的鉴定很重要，而对于透明矿物来说，则没有多大意义，因为他们的条痕都是白色或近于白色，难以作为鉴定矿物的依据。

在实际观察矿物条痕时，要注意使用矿物的新鲜面在瓷板上轻轻擦划（不要用力过猛，否则会有较大的碎块）获得较细的粉末，这样的条痕才会准确，另外，在矿物呈集合体时，一定要选准在鉴定的矿物颗粒上进行擦划，以获得良好的效果。

4.1.3 矿物的透明度

矿物的透明度是指：矿物允许可见光波透过的程度。

假设 I_0 为人射光的强度，当它穿过 1cm 的介质后光的强度减弱到 I，则

$$\frac{I}{I_0} = a$$

a 称为介质的透光系数。显然，a 值介于 0～1 之间，越近于 1，介质的透明度就越高。

自然界没有绝对透明或绝对不透明的矿物，例如极薄的金箔亦透过一部分光，极深的水亦可表现为半透明以至不透明，因此观察或判断矿物的透明度时，必须对矿物薄片的厚度有统一的规定，在实际应用上一般是把矿物制成厚度为 0.03mm 薄片进行观察，在这种厚度下观察时，基本上不透光，都是不透明矿物（如黄铁矿、方铅矿、磁铁矿等），能透光的，属于透明矿物（如石英、长石等）。当然从不透明到透明，其间的关系也是过渡的。就是在透明矿物中，它们的透明度也有很大差别。

在矿物的肉眼鉴定工作中，以矿物碎片边缘能否透见他物为准，通常将矿物的透明度分为三级：

①透明矿物　能允许绝大部分光透过的现象。肉眼鉴定标志是通过矿物碎片边缘能清晰地见到物体轮廓的细节，如水晶、冰洲石、透石膏等。

②半透明矿物　能容许部分光透过的现象。肉眼观察时，通过矿物碎片边缘只能见到物体轮廓的阴影。如浅色闪锌矿、辰砂、锡石等。

③不透明矿物　基本上不允许光透过的现象，肉眼观察时，通过矿物碎片边缘不能见到任何物体的存在，如石墨、磁铁矿等。

上述这种划分是很粗略的，相互都有过渡，也没有明确的划分标志，概括地说，金属矿物一般都是不透明矿物，非金属矿物基本上都是透明矿物。应当注意的是造岩矿物中的许多所谓暗色矿物，例如普通辉石、普通角闪石等，它们的手标本看来是不透明的，但都属于透明矿物。

矿物透明度的大小决定于矿物的化学成分和内部结构，例如具有金属键的矿物（如自然铜、自然金等），由于含有较多的自由电子，对光波的吸收较多，因而透过的光就少，透明度就很低，反之，一些具离子键或共价键的矿物（如金刚石、冰洲石等），由于不存在自由电子，它们对可见光波吸收较少，而透过光就多，透明度就高。另外，矿物的透明度还受着厚薄程度及其本身是否具裂隙解理，是否含有杂质包裹物、气泡，是否有放射性，表面是否平整光滑以及矿物集

合体方式不同等因素的影响，如透明矿物成细粒集合体时光线进人矿物不能有很长的直线进程，必须经受方向不同的多次折射，因此光线就分散了，这样的细粒集合体，肉眼观察就不太透明了，例如冰洲石（方解石）结晶是透明的，然而由方解石细粒集合体组成的大理石就不透明了。

透明度为鉴定矿物标志之一。在显微镜下鉴定矿物时，因透明度不同，所采取的方法各异，透明者利用偏光显微镜观察，不透明者则需要利用反光显微镜观察。

4.1.4 矿物的光泽

矿物的光泽是指：矿物表面对可见光的反射能力。

假设 I_0 为投射光的强度，I 为矿物的平滑表面所产生的反射光的强度，则

$$\frac{I}{I_0} = R$$

R 称为矿物的反射率，通常以百分率来表示。反射率越大，光泽就越强。

由物理光学得知，反射、折射和吸收之间有下列关系：

$$R = \frac{(N-1)^2 + N^2K^2}{(N+1)^2 + N^2K^2}$$

式中 R——矿物的反射率；

N——矿物对空气的平均折射率；

K——矿物对可见光的吸收率。

上述公式表明，矿物的光泽决定于 N 与 K 的乘积（称为吸收系数），实验已证明，吸收系数愈大，透明程度愈差，矿物光泽愈强；吸收系数愈小，则透明程度愈高，矿物光泽愈弱。

在矿物肉眼鉴定工作中，将光泽自强而弱分为以下四级：

①金属光泽　反射很强，呈如同镀了克罗米的平滑金属表面那样的反光，成金属键或以共价键为主的不透明矿物，如金属自然元素、硫化物等矿物一般均呈金属光泽，如方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、辉铜矿等。

②半金属光泽　反射较强，呈如同一般金属表面那样的反光。例如磁铁矿、铌铁矿的光泽。主要见于某些金属氧化物矿物中。

③金刚石光泽　反射较强，呈如同金刚石那样灿烂耀眼的反光，例如金刚石、白铅矿的光泽，成典型共价键的矿物以及含重金属元素或过渡元素的氧化物、含氧盐矿物，常呈金刚光泽。

④玻璃光泽　反射弱，呈如同玻璃表面那样的反光，例如石英、萤石的光泽。以离子键为主的透明矿物，特别是绝大多数的含氧盐矿物，均具有玻璃光泽。

以上四级光泽，它们的反射率和折射率范围如表 2.4.2 所列，在表中还列举了特征矿物以及它们的反射率和折射率。

从前面所述矿物的光泽与吸收系数的关系可知：矿物反射光的强弱，主要取决于它对光的折射和吸收程度的大小，折射及吸收越强，反射也越强，不透明矿物一般对光的折射和吸收都很强，因而表现为金属光泽或半金属光泽，透明矿物则相应的只具有金刚光泽或玻璃光泽。

由于光泽是指矿物表面对光的反射能力，因此，表面上光滑程度必然会影响到反射光的强弱，上述四种光泽是指矿物在平坦的晶面、解理面或磨光面上所反射的光泽，但当矿物表面不平坦或呈集合体时，由于产生散射、内反射等光学现象，常常会呈现一些特殊的光泽（变异光

泽)。

表 2.4.2 光泽与反射率及折射率的关系和特征矿物

光泽	折射率的范围(N)	反射率的范围R(%)	特征矿物		
			名称	N	R(%)
玻璃光泽	1.3～1.9	2～10	冰	1.309	2
			萤石	1.434	3.1
			石英	1.544	4.5
			刚玉	1.768	7.8
			石榴石	1.763～1.895	7.6～9.5
金刚光泽	1.9～2.6	10～19	锆石	1.95	10.2
			锡石	2.00	11.7
			闪锌矿	2.37	16.5
			金刚石	2.419	17.2
半金属光泽	2.6～3.0	19～25	铌铁矿	2.45	17.4
			辰砂	2.85	23.1
			赤铁矿	3.00	25.0
金属光泽	>3.0	>25	辉锑矿	4.046	36.0
			辉铜矿	4.7	42.0

主要的变异光泽如表 2.4.3 所列,并简述如下。

表 2.4.3 主要变异光泽

光泽 \ 反射面特点 / 变异光泽实例	断口面上或非晶质集合体	片状解理	纤维状集合体	隐晶或胶体集合体	细分散体
玻璃光泽	油脂光泽	珍珠光泽	丝绢光泽	蜡状光泽	土状光泽
	石英	白云母	石膏	叶蜡石	高岭石
金刚光泽	树脂光泽				
	闪锌矿				
半金属光泽(金属光泽)	沥青光泽				暗淡光泽
	晶质铀矿				硬锰矿

①油脂光泽、松脂光泽和沥青光泽　这三种光泽均出现在矿物的断口面上,是由于反射面不很光滑,部分光发生漫反射,减弱表面反射光的能力所致。

油脂光泽:指表面似涂了一层油脂的光泽,是玻璃光泽的变异光泽,如石英、霞石等。

树脂(松脂)光泽:指像树脂表面那样的光泽,是金刚光泽的变异,如浅色闪锌矿等。

沥青光泽:似沥青表面那样的光泽,是半金属光泽的变异,如晶质铀矿等。

②珍珠光泽　指如同蚌壳凹面(珍珠层)上的那种柔和而多彩的光泽,此种光泽均出现在层状构造而解理完全的那些透明矿物的解理面上,由于解理发育,那么它的一系列解理面对光反复产生反射,并相互发生干涉而造成的,它是玻璃光泽的变异,如云母类矿物等。

③丝绢光泽　指如同一束蚕丝反射的那种光泽，它是具有平行纤维状集合体矿物所特有的光泽，由于反射光相互干扰的结果，例如石棉、纤维石膏的光泽，亦是玻璃光泽的变异。

④蜡状光泽　指像蜡烛表面那样的光泽，出现在透明矿物的隐晶质块状集合体或胶体矿物上，也是由于反射面不很光滑所引起的，但它发生漫反射的那部分光，要比呈油脂光泽者更多一些，所以蜡状光泽比油脂光泽更暗一些，例如块状叶蜡石的光泽。

⑤土状光泽　即光泽暗淡，或者说无光泽，像土块那样。土状光泽出现在矿物的细粒集合体上，它是由于矿物的颗粒很细，颗粒间又存在许多不规则的空隙，以致所有投射过来的光基本上全都发生了漫反射，并被空隙所"吸收"，因而使得矿物表面暗淡无光，如高岭石等。属半金属光泽矿物的变异则称为暗淡光泽，如硬锰矿等。

矿物晶体的光泽具有各向异性和对称性，相同单形的晶面表现相同的光泽，不同单形的晶面，它们的光泽有差异。这点可以有效地帮助我们识别双晶，如在 α-石英等晶体上的反映。

光泽是矿物的一个主要鉴定特征，特别是对宝石类矿物光泽更为重要，是质量评选的重要标志之一。

4.1.5　矿物的透明度、光泽、颜色及条痕的关系

矿物的透明度、光泽、颜色及条痕都是可见光作用于矿物时所表现的性质，它们相互间有着内在的联系。如表 2.4.4 所列，在表中还同时列出了它们与折射率、吸收率、反射率间的关系。

表 2.4.4　透明度、光泽、颜色及条痕的相互关系

透明度	透明————————————————不透明
光　泽	玻璃——金刚——半金属————————金属
颜　色	无色——浅色——深色————————金属色
条　痕	白色——浅色————————深色或金属色
折射率	低————————————————高
吸收率	低————————————————高
反射率	低————————————————高

例如黄铁矿(FeS_2)，为不透明、金属光泽，浅铜黄色，条痕为绿黑色，吸收率高，反射率亦高。

又如方解石($CaCO_3$)，为透明、玻璃光泽，无色，条痕为白色，吸收率低，反射率亦低。

4.1.6　矿物的发光性

矿物的发光性是指：矿物在外来能量的激发下，发出可见光的性质。

能够激发矿物发光的外来能量可以是加热、摩擦以及阴极射线、紫外线、X 射线的照射，都可能使某些矿物发出一定颜色的可见光。如果在外来能量作用于矿物时，矿物即呈现发光现象，而当外来能量作用停止后，发光现象便迅速消失，这种发光现象称为荧光。若在外来能量作用停止后，矿物仍能在一段时间内继续发光，这种发光现象称为磷光。例如用紫外线照射时，白钨矿发出鲜明的浅蓝色荧光，硅锌矿发出鲜绿色磷光，用 X 射线照射金刚石时，则发出天蓝色荧光等等。

矿物的发光现象是由于组成矿物的原子或离子，在受到外来能量的激发时，其外层电子发生

跃迁过程而引起的，亦即当电子从较高的能级跳回到较低能级的空位上时，将挥放出多余的能量，此部分能量以相应波长的可见光形式发射出来，我们就可以看到矿物发出了某种颜色的光。

矿物的发光性以及发射光的颜色和强度主要是同矿物中含有的过渡元素，特别是稀土元素的种类和数量有关，例如萤石和方解石发出荧光是含有稀土元素，方柱石、玻璃蛋白石、白榴石的发光与铀有关，许多矿物呈现天蓝色的光彩与铕的存在有关，绛红色光的发生是与钐的存在有关，钙的磷酸盐中若有镧族元素代替钙时常发生磷光（目前彩色电视显像系统所用的荧光材料主要是稀土元素的磷酸盐所组成），又如白钨矿其 Mo 含量约为 0.5%时，在紫外光照射下，通常显光亮的浅蓝色荧光，含 Mo 较多为 0.96%～4.8%时，则为黄色荧光，Mo 含量达 4.8%以上时，则为白色荧光。通常将这些能引起矿物发光的元素称为活化剂或激素，对于硅酸盐矿物而言，若含大约 1%的过渡金属离子，特别是锰离子，即是有效的活化剂。

已知具有发光性的矿物，都是晶质矿物，但是，有的矿物的发光性比较固定，有的则不固定。事实上，不同矿床所产的同种矿物，常可发生不同颜色的荧光，而不同的矿物也可有相近似的荧光。此外，矿物的发光性还与外来能量的性质有关，波长为 2500Å 和 3600Å 的紫外线辐射特别有用，它们分别能被硅酸盐和硫化物矿物强烈吸收，并使矿物发光。

矿物的发光性在某些矿物的鉴定和找矿与勘探工作中均具有一定的实际意义。特别是对白钨矿、金刚石、锆石等矿物更为有用。此外，人造晶体的发光性，被用于检察和测量离子化辐射。例如人造硅锌矿、铂氰化钡等用以制作 X 射线荧光屏，用铊活化的碘化钠晶体的发光性，则是测量辐射用的闪烁计数管工作的基础。

4.2 矿物的力学性质

矿物的力学性质是指，矿物在外力作用下（如刻画、打击、挤压、拉引等）所表现出来的各种性质，现分述如下：

4.2.1 矿物的解理、断口

1. 矿物的解理

矿物晶体在外力作用下（如敲打、挤压等）严格沿着一定结晶方向破裂，并能裂成光滑平面的性质称为解理，这些光滑平面称为解理面。

显然，矿物晶体的解理受其内部结构的控制，解理面一般平行于面网密度最大的面网。面网密度最大的面网，其面网间距也最大，因而相邻面网间的联结力就最弱，解理就易于沿着这些方向发生。

在分子晶格中，由于分子键力远小于化学键力，因此，它们的解理总是沿着分子与分子之间的平面产生。这在具有层状结构的矿物中（例如石墨、辉钼矿、滑石等）表现得非常明显，这些矿物都具有平行结构层的极完全解理。

解理是晶体固有的特性，它既体现出晶体的异向性（在同一矿物晶体上可同时出现不同方向和不同程度的解理），又体现出晶体的对称性，亦即若平行于晶体中某一面网方向有解理存在的话，那么，与此面网成对称重复关系的其他面网方向上，也应该同样存在性质相同的解理。一系列相互平行的解理面称为一组解理，因此，解理面在晶体中的方向可用相应的单形符号或单形名称来表示。例如石墨属六方晶系，有平行{0001}的解理，则解理的组数为一组；方解石

属三方晶系，有平行菱面体{10$\bar{1}$1}的解理，则解理组数必为三组；萤石属等轴晶系，有平行{111}的八面体解理，则它有四组斜交的解理；方铅矿具有{100}立方体解理，表示它有平行于立方体中(100)、(010)和(001)三组互相垂直的解理。采用单形符号来表示矿物晶体的解理，它既可以表示解理的方向，又可以表示解理的组数和夹角。

在不同的晶体中，或是在同一晶体的不同单形的晶面方向上，由于其面网之间的键力有强有弱，因而表现在解理面上的完好程度也就不同，如解理面的大小、光滑程度、易见程度，解理块的大小、厚度等等。在矿物学中，根据解理的发育完善程度分为五个等级：

①极完全解理　矿物晶体受力后，极易沿解理面分裂成薄片，解理面平整光滑，延续性极好，如云母的{001}底面解理，透石膏的{010}解理等。

②完全解理　矿物晶体受力后，很易沿解理面裂成平面(不成薄片，裂成规则的解理块)，解理面显著而平整延续性很好，如方解石的{10$\bar{1}$1}菱面体解理，萤石的{111}八面体解理。

③中等解理　矿物晶体受力后，可沿解理面裂成平面，解理面较清楚，但不太平整光滑，延续性一般，碎块上往往既可见解理面，又可见断口，如辉石、角闪石的{110}柱面解理等。

④不完全解理　矿物晶体受力后，沿解理面分裂较困难，仅断续可见不明显的解理面，不平整光滑，延续性很差，碎块上主要是断口，仔细观察才能见到解理面，如橄榄石的{010}解理，绿柱石的{0001}底面解理等。

⑤极不完全解理　矿物晶体受力后，极难出现解理面实际上无解理，其碎块上常见断口，仅在显微镜下偶见零星的解理面，如 α-石英的{10$\bar{1}$1}菱面体解理等。

上述五个等级解理的特征，可以归纳如表 2.4.5。

表 2.4.5　各解理等级的特征

解理等级	解理面出现的难易程度		解理面的平滑程度	断口发育程度
极完全	易	易剥成薄片	最平滑	最　差
完　全		不能剥成薄片，可裂成解理块	平滑	↓
中　等	不易		中等	
不完全	难		差	
极不完全	最难或不出现		最差	最发育

由上表可见，矿物的解理与断口出现的难易程度是互为消长的。在容易出现解理的方向则不易出现断口，一个晶体上如被解理面包围愈多，则断口出现的机会愈少。

不同矿物晶体，其解理发育程度不同，包括一些通常认为无解理的晶体，如 α-石英等，都程度不等地发育有解理。不过，也有些晶体真正不具有解理。例如金、铜等金属晶格，由于其键性的特点，受力后晶格内会发生滑移，表现为延展性，而不表现为解理。

解理是晶质矿物的稳定的性质，它不因外界因素的影响而发生变化，因此它是鉴定矿物的重要依据之一。例如普通辉石与普通角闪石的许多特征都十分相似，肉眼难以区别，但它们的平行{110}解理交角不同，前者交角为 93°、87°，后者为 124°、56°，据此可把它们区别开来，对于已知矿物还可根据解理面的方向来确定其晶粒的结晶方向，这在显微镜下鉴定中，经常起着重要的作用。此外，解理的方向与完好程度，在一定程度上还可指示晶体结构的特点。例如，具一向极完全解理者，都具有层状结构，具两向柱面解理者往往具链状结构。

描述矿物的解理时，应包括这些内容：解理方向(用单形符号表示)，解理完善程度(解理等

级），有时还要说明解理的夹角，在实际观察解理时，应特别注意解理面与晶面的区别，如表2.4.6所列。

表 2.4.6　解理面与晶面的区别

解　理　面	晶　　面
①为晶体内部结构上联结力弱的方向，受力后可连续出现互相平行的平面。 ②解理面上一般比较光亮。 ③解理面比较平整，但可出现规则的阶梯状解理面或纹。这是由于受力后，沿着解理方向自里向外的破裂面层层重叠而成。	①为晶体最外面的一层平面，受力后立即消失。 ②晶面上一般比较暗淡。 ③晶面一般不太平整，仔细观察时常有凹凸不平的痕迹或各种晶面花纹。

2. 矿物的断口

断口是指矿物在外力作用下，在任意方向破裂并呈各种凹凸不平的断面，则这样的断面称为断口。

具有不完全解理或不具解理的晶质矿物以及隐晶质和非晶质矿物在外力作用下均可出现断口，既可在单晶体上出现，也可在同种矿物的集合体中出现。容易产生断口的矿物，由于它的断口常具有一定的形态，因此也可利用断口作为鉴定矿物的一种辅助特征，但其性质不如解理那样固定。矿物断口的形态主要有以下几种：

①贝壳状断口　断面呈椭圆形光滑曲面的形态，且具有以受力点为圆心的同心圆波纹，与蚌壳表面极为相似，如α-石英及玻璃质矿物常具此种断口。

②纤维状及多片状断口　断面呈纤维丝状或错综细片状，具有纤维状和条片状结构的集合体矿物具有此种断口，如纤维石膏、蛇纹石等。

③平坦状断口　断面平坦，并呈细粉状，为土状块体或致密块体的矿物，例如高岭石所特有的粗糙断口。

④锯齿状断口　断面呈尖锐锯齿状形态，延展性很强的矿物常具此种断口，例如自然铜。

⑤参差状断口　断面参差不齐，粗糙起伏，幅度可大可小，绝大多数矿物以及呈块状或粒状集合体者常具此种断口，例如磷灰石等等。

⑥阶梯状断口　是由解理面和参差状断口反复交替出现所形成，呈阶梯状，它只出现在具中等或完全解理的单晶体上，例如长石的断口。

4.2.2　矿物的硬度

硬度是指矿物抵抗某种外来机械作用（如刻画、压入、研磨等）的强度，根据机械作用力性质不同，硬度可以分为刻画硬度、压入硬度和研磨硬度三大类，硬度的符号为 H。

在矿物的肉眼鉴定工作中，通常都采用摩氏硬度，摩氏硬度是一种刻画硬度，它是以 10 种具有不同硬度的矿物作为标准，构成摩氏硬度计，如表 2.4.7 所列。其他矿物的硬度是与摩氏硬度计中的标准矿物相比较来确定的，如有一矿物能划动磷灰石（即其硬度大于磷灰石），但又能被正长石所刻画（即其硬度小于正长石），则该矿物的硬度为 5 到 6 之间，写成 5～6。

摩氏硬度计中 10 种标准矿物等级之间只表示硬度的相对大小，各级之间硬度的差异不是均等的，矿物学中一般所称的硬度都是指摩氏硬度，显然，它是较为粗略的，但在实际应用上，却简单、方便、实用，通常在野外地质工作中，还可用其他工具帮助测定矿物的硬度。如指甲的

硬度约为 2～2.5，铜钥匙之类的硬度约为 3，小钢刀的硬度约为 5～5.5，窗玻璃的硬度约为 6。

表 2.4.7 摩氏硬度计

硬度等级	代表矿物	硬度等级	代表矿物
1	滑石	6	正长石
2	石膏	7	石英
3	方解石	8	黄晶
4	萤石	9	刚玉
5	磷灰石	10	金刚石

在测定矿物硬度时，必须选择纯净、致密而新鲜的面上进行刻画，最好能选用单晶体，因为风化、裂隙、杂质及集合体方式等都会影响矿物的硬度，风化后的矿物硬度一般降低(如赤铁矿的硬度为 6，而受风化红色土状赤铁矿的硬度还不到 1)。有裂隙及杂质的存在，会影响矿物内部构造的联结力，致使硬度降低。集合体如呈细粒状、土状、粉末状或纤维状，则很难精确确定其单体的硬度。有时某些矿物具明显脆性，当被小刀割划时极易脆裂成小粒脱落，此并非表示矿物的硬度小于小刀。

除摩氏硬度外，还有一种维氏硬度，是一种压入硬度又称为绝对硬度。它是用一个呈四方锥形(相对锥面间的夹角 α 为 136°)的金刚石角锥，负载一定的荷重 p(kg)，压入矿物，然后根据矿物表面所留凹痕的对角线长度 d(mm)，按下式计算矿物的硬度 H：

$$H = 2\sin\frac{\alpha}{2}\cdot\frac{p}{d^2}$$

根据经验公式，在摩氏硬度 HM 和维氏硬度 HV 之间，大致存在着如下的关系(此关系不能适用于金刚石)：

$$HM = 0.7\sqrt[3]{HV(\mathrm{kg/mm^2})}$$

摩氏硬度完全是一种相对硬度，在它的 10 种标准矿物中，逐级之间硬度增高的幅度是极不规则的，当用不同方法测定 10 种标准矿物时，由于作用的物理过程不同，测出的硬度值彼此间是不相对应的，增高的幅度是极不规则的，表 2.4.8 列出了用不同方法测定 10 种标准矿物的硬度情况。

表 2.4.8 用不同方法测定 10 种标准矿物的硬度

矿物	摩氏硬度	由测硬计测定的刻画硬度(以刚玉为 1000)	维氏压入硬度($\mathrm{kg/mm^2}$)	罗氏相对研磨硬度(以石英为 100)
滑　石	1	2.3	2	0.03
石　膏	2	9.5	3.5	1.04
方解石	3	22.5	172	3.75
萤　石	4	25.5	248	4.17
磷灰石	5	35.5	610	5.42
正长石	6	108	930	31.0
石　英	7	300	1120	100
黄　晶	8	450	1250	146
刚　玉	9	1000	2100	833
金刚石	10	—	～10000	117000

矿物的硬度是鉴定矿物的重要物理常数和标志，矿物硬度的异向性可以探索一些矿物的内部结构和晶体化学特征。并且某些矿物种硬度的细微变化常常同形成条件有关，因此硬度还可以作为矿物成因的标志之一。

此外，矿物的硬度在工业技术上有重要意义，例如高硬度的金刚石广泛地被用于研磨、抛光、切割等重要工具。工业金刚石与冶金、石油、机械、光学仪器、电子工业、空间技术等的发展密切相关，低硬度的石墨则是重要的固体润滑剂。

4.2.3 矿物的其他力学性质

这些性质在鉴定矿物时，仅具有次要意义，但是对具有这些性质的矿物，却是明显的特征。同时矿物原料在进行技术试验和工艺加工时，这些性质又具有重要意义。

1. 脆性

矿物受外力作用时容易破碎的性质称为脆性。脆性矿物用刀刻划时，易成粉末，即使矿物硬度大于小刀，也可被小刀压碎出现小粒或粉末。绝大多数矿物具有这种性质，脆性是纯离子键矿物的一种特性，所以，离子键性程度的百分数越大，矿物的脆性越强，例如方铅矿、闪锌矿、硫黄等。

2. 延展性

矿物在受到外力的拉引时，能发生塑性形变，而趋向于形成细丝的性质，称为矿物的延性。在受到外力的碾压或锤击时，能发生塑性形变，而趋向于形成薄片的性质，称为矿物的展性，延性和展性几乎总是同时并存的，一般通称为延展性。

通常温度增高时，延展性增强，而构造歪曲和杂质混入则使延展性降低。

自然金属矿物如自然金、自然银、自然铜等均具有良好的延展性，一些硫化物矿物如辉铜矿也具有一定程度的延展性。具有延展性的矿物，刀刻后留下光亮的痕迹，而不出现粉末或碎粉。

延展性是纯金属键矿物的一种特性，纯金属键的矿物在外力作用下的一个特征是产生塑性形变，这就意味着晶体中的一部分晶格可相对于毗邻的另一部分晶格依循一定的面网和沿着一定的行列方向发生相对位移，但并不导致晶格的破裂，这是金属键矿物具有延展性的根本原因，金属键程度不同，则延展性也有差异。

延展性对于金属自然元素矿物及某些硫化物具有鉴定意义，至于延展性在机械加工工业中的作用就更为重要了。

3. 弹性和挠性

矿物的弹性是指某些片状或纤维状矿物，在受到外力作用时，能发生弯曲形变，但并不断裂，当外力解除后又能恢复到原来状态的性质。而挠性是指当外力作用取消后，弯曲了的形变不能恢复原状的性质，前者如云母、石棉，后者如滑石、绿泥石等。

矿物的弹性和挠性，都决定于晶格内部的结构特点。弹性的实质是一些层状结构的矿物，在它内部相邻的结构单元层之间，都还存在有低价、大半径的阳离子 K^+，因而使层与层之间的键力有一定程度的加强。当受力时，层间虽然仍可发生相对位移，使整个薄片弯曲，但位移破坏了 K^+ 与阴离子之间的平衡位置，产生了内应力，当外力解除后，这种内应力就要促使质点恢复到平衡位置，结果就表现出弹性。而具有挠性的矿物，在其相邻的结构单元层之间只以微弱的分子键力相联系，当受力时，层间即可发生相对位移，使整个薄片弯曲，但基本上不产生

内应力，因此，当外力除去后，内部就没有力量促使晶格恢复到原来的状态，从而表现为挠性。

矿物的弹性和挠性，主要是区别云母、绿泥石等一些矿物的鉴定特征。此外，在石棉的加工利用上，也具有实际意义。

4. 可塑性

某些矿物加水后，能随外力塑成任意形状的性质，例如粘土矿物高岭石等。

4.2.4 矿物的比密度

矿物的比密度是指纯净、均匀的单矿物在空气中的质量与同体积水在4℃时质量之比。如果矿物在空气中的质量为 p 克，在4℃水中的质量为 p_1 克，则

$$矿物的比密度\ G=\frac{p}{p-p_1}$$

由于4℃时水的密度为1(g/cm³)，因此，矿物的比密度数值与密度的数值正好相等，矿物的密度 D 是指矿物单位体积的质量，单位为 g/cm³。

每种矿物都有自己的组成元素和晶体构造，所以都有自己的比密度，它是鉴定矿物的一项重要的物理常数，也是重力找矿选矿的重要依据。

矿物的比密度变化幅度很大，可在小于1(如天然气、石蜡)至23(如锇钌族矿物)之间，自然金属元素矿物比密度最大，盐类矿物比密度较小，在肉眼鉴定工作中，通常是凭经验用手估量，将矿物比密度分为三级。

轻级：比密度小于2.5。如石墨(2.5)、自然硫(2.05～2.08)、石盐(2.1～2.5)、石膏(2.3)等。

中级：比密度由2.5到4，大多数矿物的比密度属于此级。如石英(2.65)、斜长石(2.61～2.76)、萤石(3.18)、金刚石(3.5)等。

重级：比密度大于4，如重晶石(4.3～4.7)、硫铁矿(4.6～5.2)、方铅矿(7.4～7.6)、自然金(14.6～18.3)、铂族矿物(14～21)、锇钌族矿物(17～23)。

在矿物的重砂分析工作中，是以常用的重液三溴甲烷的比密度2.9为界，大于2.9的为重矿物，小于2.9的为轻矿物。

矿物的比密度决定于其化学成分和内部结构，主要与组成元素的原子量、原子或离子半径和质点堆积的紧密程度有关，此外矿物的形成条件——温度和压力对矿物的比密度的变化也起重要的作用。

①在等结构的矿物中，组成元素的原子量增大时，比密度(或密度)相应增高如表2.4.9。

表2.4.9 天青石、重晶石、铅矾的原子量与比密度之间的关系

矿物	化学式	原子量	比密度
天青石	$SrSO_4$	Sr=87.63	3.9～4.0
重晶石	$BaSO_4$	Ba=137.26	4.3～4.5
铅矾	$PbSO_4$	Pb=207.21	6.1～6.4

应该注意的是：如当原子量的增加不足以抵消因原子或离子半径或原子间距增大所减小的比密度时，则原子量尽管增大，比密度也不一定增大，如表2.4.10所示，钾的原子量大于钠的原子量，由于钾盐的原子间距较大，所以钾的化合物的比密度仍低于钠的化合物。

表 2.4.10 钾盐、石盐的原子量、原子间距与比密度关系

矿物	化学式	原子量和分子量	原子间距 Å	比密度
钾盐	KCl	39.1+35.5=74.6	3.14	1.99
石盐	NaCl	23.0+35.5=58.5	2.82	2.17

②阳离子配位数的改变将导致矿物晶体结构的改变。显然，随之就要改变矿物的比密度或密度。

对于同质多象变体，阳离子配位数增大，比密度（或密度）随之增大，如表 2.4.11 所列。

表 2.4.11 比密度与阳离子配位数关系

矿物及化学式	配位数	原子间距(Å)	比密度	形成条件
金刚石 C	4	1.54	3.5	高压
石墨 C	3	1.42(层内)，3.35(层间)	2.23	低压
文石 $CaCO_3$	9	2.53	2.95	低温
方解石 $CaCO_3$	6	2.37	2.23	中温

表 2.4.11 中金刚石和石墨，它们是 C 的同质二象变体，两者均由碳原子组成，具有相同的原子半径，但在金刚石中，C 原子的配位数为 4，在石墨中则为 3，配位数越高，意味着质点的堆积紧密，比密度就越大。方解石和文石，Ca^{2+} 的配位数与晶体的比密度间也有同样的关系。

③矿物形成时的温度和压力对矿物比密度的变化有一定的影响。温度升高有利于阳离子配位数的降低，也就是有利于比密度小的矿物的形式，如表 2.4.11 方解石和文石的形成条件与比密度的关系。压力的加大则有利于比密度大的矿物的形成，见表 2.4.11 金刚石与石墨的形成条件和比密度的关系。

因此，岩浆早期，深成变质形成的矿物，因压力大，则比密度大，而表生氧化矿物则比密度较小。

应该指出，同一种矿物，由于化学成分的变化，类质同象混入物的代换，机械混入物及包裹体的存在，洞穴与裂隙中空气的吸附等等对矿物的比密度均会有影响，因此，在测定矿物比密度时，必须选择纯净、未风化的矿物。

4.3 矿物的电学性质

4.3.1 导电性

矿物的导电性是矿物对电流的传导能力。

根据矿物导电能力的不同，可分成下列三种：

1. 良导体

电阻系数为 $10^{-6} \sim 10^{2} \Omega \cdot cm$，包括金属自然元素矿物及某些金属硫化物如黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、辉钼矿等。

2. 半导体

电阻系数为 $10^{3} \sim 10^{10} \Omega \cdot cm$，如金刚石、金红石等，包括较少的富含铁和锰的硅酸盐及铁、锰等元素的氧化物（某些绝缘体当温度升高时，便变成半导体）。

3. 绝缘体(非导体)

在室温下电阻系数为 $10^{11} \sim 10^{16} \Omega \cdot cm$(或更大)的矿物,如石英、长石、云母、石棉、石膏、方解石、尖晶石、橄榄石等。

矿物的导电性主要依赖于化学键的类型,具金属键的矿物因为在晶体结构中有自由电子存在,故其导电性强,离子键或共价键矿物导电性弱或不导电,一般说来,金属矿物是电的良导体,非金属矿物是电的半导体或绝缘体,半导体又因光热、放射能刺激而导电。

矿物的导电性通常用测定矿物的电阻率来表示,电阻率的倒数即为电导率,电阻率愈小时,则电导率愈大。

如用实验方法先求得电阻,即可按下列公式求出矿物的电阻率:

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

式中 ρ——物质的电阻率($\Omega \cdot m$);

R——电阻(Ω);

L——长度(m);

S——截面积(m^2)。

某些矿物的电阻率见表 2.4.12。

表 2.4.12 某些矿物的电阻率

矿物名称	电阻率($\Omega \cdot cm$)	矿物名称	电阻率($\Omega \cdot cm$)
辉银矿	0.0067	磁黄铁矿	0.0050~0.01
方铅矿	0.037	赤铁矿	0.35~1200
黄铁矿	0.0023~1.5	钛铁矿	220
闪锌矿	10^4	毒砂	0.13
斑铜矿	0.05~0.5	辉铜矿	2.30
纤维锌矿	350	白铁矿	1.4~300
辉钼矿	1.9~16000	辉锑矿	$10 \sim 10^4$

根据实验证明矿物晶体的导电性,除等轴晶系外,均反映了异向性,如三方晶系的赤铁矿,垂直于 L^3 方向的电导率比平行 L^3 方向要大得多。又如方解石和石英,在平行 Z 轴方向和垂直 Z 轴方向的异向性不同,见表 2.4.13。

表 2.4.13 石英、方解石晶体导电性的异向性

矿物	结晶方向	电阻系数($\Omega \cdot cm$)	实验温度(℃)
石 英	$/\!/ Z$ 轴	2×10^{14}	17.2
	$\perp Z$ 轴	2×10^{16}	
方解石	$/\!/ Z$ 轴	5.15×10^{14}	17.2
	$\perp Z$ 轴	9.5×10^{15}	

此外,大多数矿物根据其所含杂质的不同,导电性也有变化,如无色锡石为电的不良导体,而它的带色亚种则是良导体。矿物的导电性还随温度的增高而增高。

导电性不仅用于鉴定矿物,而且还有重要的实际意义。金属和石墨是电的良导体,可作为电极原料。云母和石棉是电的不良导体,可作为绝缘材料,而半导体则广泛地被应用在无线电工业中。另外在金属矿床的找矿中应用电法找矿,在选矿和重砂矿物的分离上,也根据矿物导电系数不同,采用电化学分离。

4.3.2 压电性

压电性是指某些矿物晶体在机械作用的压力或张力影响下产生电荷的性质。在压缩时发生正电荷的部位，在伸张时就发生负电荷。在这样一压一张的相互不断地作用下，就可以产生一个交变电场。这种由于应力的作用而激起表面荷电的效应称为“正压电效应”，反过来，具有压电性的矿物晶体，把它放在一个交变电场中，它就会产生一伸一缩的机械振动，即形成“超声波”，这种效应为“反压电效应”，亦称“电致伸缩”。

矿物的压电性只发生在无对称中心，具有极性轴的各晶类的矿物中（如石英），这一特点可以帮助我们正确地确定晶体的对称性。压电效应在现代科技中愈来愈被广泛地应用，如压电水晶在无线电工业中用作各种超声波发生器等。

4.3.3 热电性

热电性是指某些矿物晶体当温度变化时（受热或冷却），在其晶体的某些结晶方向产生荷电的性质。如电气石晶体加热到一定温度时，其 Z 轴的一端带正电，另一端则带负电，若将已热的晶体冷却，则两端电荷变号。

矿物的热电性主要存在于无对称中心，具有极轴（晶体两端无对称关系）的介电质矿物晶体中，如电气石、方硼石、异极矿等。

热电性也可用来帮助确定晶体的真实对称性，此外，晶体的热电性已在红外探测中得到应用，对某些矿物热电性的研究将有助于对矿床成因的分析。

4.3.4 介电性

矿物的介电性是指某些矿物在电场中被极化的性质，通常用测定介电常数（电容率）来研究。

当几种矿物同时在一种电介质液体中时，矿物的介电常数比电介质溶液大的就被电极所吸引，因此，用一些已知介电常数的溶液作电介质液体时，就可测出此矿物的介电常数，并且可把这一种矿物从许多其他矿物中分离出来。

在矿物、矿床及地球化学的研究中，对单矿物样品的需要是很迫切的，而用人工手选单矿物样品既慢又不纯，用介电分离法可以又快又好地解决这一问题。

矿物的电学性质还有光电性（光能刺激后能导电的性质）、摩电性（毛皮擦之可带电的性质，如硫黄、金刚石）等，此处不论述。

4.4 矿物的磁学性质

矿物的磁性是指：在外磁场作用下，矿物被磁化时所表现的性质，包括被外磁场所吸引、排斥以及被磁化的矿物对外界产生磁场等。

物体的磁性可由磁化率 X 来表征。

$$X = M/H$$

式中 H——外磁场强度；

M——单位体积中的磁矩。

矿物的磁性主要分为以下三种：

1. 铁磁性矿物

在外磁场作用下有强烈的吸引现象，并为外磁场永久磁化，从而本身又产生一个磁场，可以吸引铁屑，在外磁场撤除后，仍能保持一定强度的磁化，即可保留有剩余磁性，这类磁性物质的矿物称为铁磁性矿物。它是磁性最强的矿物，但为数不多，如磁铁矿、磁黄铁矿等，这类矿物在磁场内，能使磁场强度特别增高，磁化率约在 $1\sim10^4$ 之间，它们能被永久磁铁所吸引。

2. 顺磁性矿物

在外磁场作用下有被吸引现象，但磁化十分微弱，其本身不能吸引铁屑，当外磁场撤除后，磁化立即消失，顺磁性矿物的磁化率 X 大于零，其值约在 $10^{-6}\sim10^{-4}$之间，并随温度的增高而减小。这类矿物更多，它们不能被永久磁铁吸引，但可被强的电磁铁所吸引，如角闪石、辉石、电气石等。这类矿物在磁场内，能使磁场强度增高。

3. 逆磁性矿物

此类矿物在外磁场作用下磁化极其微弱，微呈被排斥现象，因而其磁化方向与外磁场方向相反，当外磁场撤除后，磁化立即消失，磁化率为负值。这类矿物能被永久磁铁所排斥，它们在磁场内，能使磁场强度减低，如方解石、石盐、黄铁矿等。

一切物质的磁性都是起源于电流，在物质的原子、分子或分子团等物质微粒内部，存在着一种环形电流，这种环形电流就像导线中的电流一样，在它们的周围空间形成磁场，使每个物质微粒都成为一个微小的磁体。一般物体通常不显示出磁性，是因为物体中的各个物质微粒由于自旋形成电流的方向是互不相同的、紊乱的，它们的磁作用互相抵消了的缘故，至于能显示出磁性的物体，是因为物体中的各个物质微粒的环形电流的方向大致相同(所谓环形电流就是电子自旋所形成的电流)。

矿物的磁性总是与其成分中是否含有磁性元素(铁、钴、镍、铅、钛、钒)有密切关系，磁性的强度与矿物中含这些元素的多少，特别与含铁的多少有关。某些矿物的磁性是变化的，这与其中含有铁的类质同象混入物或铁质包裹体的多少密切相关，例如纯粹的透辉石是抗磁的，属于无磁性矿物，但当含有类质同象的 Fe^{2+} 时，就变成是顺磁性了，属于弱电磁性矿物。

表 2.4.14　矿物的磁性

强磁性	中磁性	弱磁性	无磁性
自然铁	角闪石(暗色)	角闪石(淡色)	金刚石、锡石、金红石、菱铁矿
	黑云母		
磁铁矿	黑褐矿	钛铀矿	红柱石、蓝晶石、硅线石、菱锌矿
	赤铁矿		
钛磁铁矿	石榴石(暗色)	石榴石(淡色)	磷灰石、辰砂、锂辉石、十字石
	钛铁矿		毒砂、刚玉、黄晶、透闪石
磁黄铁矿	铌铁矿	磷铈镧矿	雌黄、孔雀石、萤石、辉钼矿
	钽铁矿		
粗铂矿	铬尖晶石	褐帘石	无色电气石、自然铜、白铅矿、锆石
	辉石(暗色)	辉石(淡色)	重晶石、辉铜矿、黝帘石、白钨矿
	软锰矿		
	硬锰矿	烧绿石	绿柱石、黄铁矿、尖晶石、闪锌矿
	铌钇矿	榍石	
	电气石(暗色)	电气石(淡色)	板钛矿、无色辉石、蓝铜矿、自然金
	钨铁矿		
	铬铁矿	尖晶石(淡色)	方铅矿、雌黄、自然铜、自然银
	绿帘石		

矿物晶体的磁性也呈各向异性，例如铁的单晶，沿[100]方向最易磁化，沿[110]方向次之，沿[111]方向磁化则较难。

一般地质工作中，对矿物的磁性可概括地分为四级：

①强磁性矿物　用普通马蹄磁铁能吸引住的矿物，相当于铁磁性矿物。

②中等磁性矿物　用普通马蹄磁铁不能吸引，而能用电流不大的弱电磁铁吸引住的矿物。

③弱磁性矿物　用电流很大的强电磁铁才能吸引住的矿物。

④无磁性矿物　用强电磁铁也不能吸引住的矿物。

常见矿物的磁性强弱见表 2.4.14。

利用矿物的磁性不仅可以用来鉴定和分选矿物，同时还是磁法探矿和古地磁研究的依据，此外，在陶瓷工业中对粘土原料中的铁质就是通过矿物的磁性而清除的。

4.5　矿物的放射性

含有铀(U)、钍(Th)、镭(Ra)等放射性元素矿物，由于放射性元素的蜕变而放出 α、β、γ 等射线的性质，叫做矿物的放射性。

原子序数在 84 以上的元素都具有放射性，原子序数在 83 以下的某些元素如 K、Rb 等也具有放射性。

关于元素的放射性现象及放射元素蜕变过程，在物理学及化学课程中已有阐述，在此从略。

利用矿物的放射性不仅可以鉴定放射性元素矿物和找寻放射性元素矿床，同时对于计算矿物及地层的绝对年龄也极为重要。

测定放射性的方法通常用盖氏计数器、闪烁计数器、照片感光法等。

4.6　矿物的其他物理性质

除前面所述物理性质之外，在矿物鉴定、矿床寻找、勘探的实际工作中还可利用其他的一些物理性质，这些性质虽较次要，但在某些场合中，它的作用却是有效的。

易燃性：某些矿物加热后易燃烧的性质，如自然硫、有机矿物(石油等)。

挥发性：矿物在燃烧过程中，某些化学成分易挥发的性能，如雄黄、雌黄等。

吸水性：某些矿物能吸收空气中水分的能力。吸水强者，表面可潮解，如光卤石；或成粘稠状，粘舌头，如高岭石等。

人们感觉器官对某些矿物所能觉察到的性质有以下几种：

嗅觉：如燃烧自然硫及黄铁矿时有硫臭，锤击毒砂时有大蒜臭，摩擦磷灰石有毛皮焦灼臭，湿高岭石有土臭等。

触觉：如硅藻土、铝土矿之粗糙感，滑石、叶蜡石之滑腻感。

味觉：为易溶矿物所特有，如石盐之咸味，明矾之甜涩味，泻利盐之苦味等。

音响：如白铅矿($PbCO_3$)块掉到地上时，发出似玻璃落地之声音。

综上所述，矿物的物理性质是肉眼鉴定矿物的基础，因此要熟练地掌握矿物的各种物理特征，为学习矿物理论打下良好的基础，为以后学习专业课程及寻找陶瓷原料基地创造有利的条件。

5 矿物的分类及命名

5.1 矿物的分类

为了系统、全面地研究矿物，为了从矿物的本质及各种矿物的相互关系中寻找其全面的、系统的规律性，就必须对矿物进行科学分类。

矿物的分类方法很多，早期曾采用单纯以化学成分为依据的化学成分分类。近年来，又有人提出以元素的地球化学特征为依据的地球化学分类和以矿物成因为依据的成因分类等。但目前矿物学中所广泛采用的是以矿物的成分、结构为依据的晶体化学分类。矿物的本质是成分和结构的统一，它们决定了矿物本身的性质，并与一定的生成条件有关，在一定程度上也反映了自然界元素结合的规律。因此，这是一种比较合理的分类方法。

本书采用按晶体化学原则所作的分类，分类体系如表 2.5.1。

表 2.5.1 矿物的晶体化学分类体系

类　别	划　分　依　据	举　例
大类	1. 化合物类型；2. 化学键	含氧盐大类
类	阴离子或络阴离子种类	硅酸盐类
（亚类）	络阴离子结构	层状结构硅酸盐亚类
族	晶体结构型和阳离子性质	云母族
（亚族）	阳离子种类	白云母亚族
种	一定的晶体结构和一定的化学成分	白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$
（亚种）	在完全类质同象系列中，根据其所含端元组分的比例划分	
（异种）或（变种）	晶体结构相同，成分或物性稍异	含铁白云母 $K(Al,Fe)_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

矿物分类的基本单位是种。所谓"种"，应当把它理解为具有一定的晶体结构和一定的化学成分的独立单位。这里所谓的"一定"也是有相对意义的，由于类质同象的代换，它们可以在一定的范围内产生变化。

对于连续类质同象系列，通常可根据端员组分所占的不同比例而划分为几个矿物种或亚种。如橄榄石的类质同象系列可分为镁橄榄石 $Mg_2[SiO_4]$—橄榄石 $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$—铁橄榄石 $Fe_2[SiO_4]$三个矿物种，不同作者对某些系列的划分方法也可能有所不同，也有的作者把一个连续类质同象系列视为一个种，其下再进一步划分亚种。但根据国际及我国新矿物及矿物命名委员会的规定，在类质同象系列中，只有端员矿物才能独立命名，而中间成分称变种。

对于同质多象的各个变体，虽然它们的化学成分相同，但晶体结构不同，性质各异，因此它们各自应被视为独立的矿物种。

变种（异种）的晶体结构相同，但成分或物性稍异，划分的标志如下：

①成分稍异　如黄铁矿（FeS_2）中，含有一定量的 Co，而形成异种钴黄铁矿 $(Fe,Co)S_2$。

②物性稍异　如水晶一般无色透明，而其异种紫水晶具有紫色的特征。

对于多型的不同变体，由于它们成分相同，在结构和性质上的差异也很小，一般仍把它们视为是属于同一个矿物种。

根据上述分类原则，本书对矿物采用如下的具体分类：

第一大类　自然元素

　　第一类　自然金属元素

　　第二类　自然半金属元素

　　第三类　自然非金属元素

第二大类　硫化物及其类似化合物

　　第一类　简单硫化物

　　第二类　复硫化物

　　第三类　硫盐

第三大类　氧化物和氢氧化物

　　第一类　氧化物

　　第二类　氢氧化物

第四大类　含氧盐

　　第一类　硅酸盐

　　第二类　硼酸盐

　　第三类　磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐

　　第四类　钨酸盐、钼酸盐

　　第五类　铬酸盐

　　第六类　硫酸盐

　　第七类　碳酸盐

　　第八类　硝酸盐

第五大类　卤化物

以上皆为无机矿物，本书内未列入有机矿物。

5.2　矿物的命名

每一种矿物都有它自己固定的名称。矿物命名有各种不同的依据，有的是根据矿物本身的特征，如化学成分、形态、物理性质等命名的，有的是以发现该矿物的地点或人的名字来命名的。但以矿物特征命名的为多，这有助于熟悉该矿物的成分和性质。现举例说明如表 2.5.2。

在矿物命名方面，我国有着悠久的历史，如水晶、雄黄等名称，在 2000 多年前的古籍《山海经》中就有记载，这些矿物名称至今仍在沿用。

我国习惯上对于呈现金属光泽的或者是可以从中提炼金属的矿物，往往称之为××矿，如黄铜矿、方铅矿等；对于非金属光泽的矿物，往往称之为××石，如方解石、重晶石等；对于宝玉石类矿物，常称之为×玉，如刚玉、软玉；对于地表次生矿物，常称之为×华，如钴华、钨华等。

我国现用矿物种名称，除沿用我国所固有的名称或为我国所发现的矿物由我国命名者外，还有很多系根据外文名称翻译而来，中译名大多是根据矿物的成分，间或考虑一些形态、物性

特点来定名的。也有的系采用音译，其中包括一些以地名命名的矿物。现在世界上已知矿物已达 3000 余种，种类繁多，成分错综复杂，但目前译名尚无统一的原则，这有时就会造成一些混淆。有鉴于此，我国新矿物及矿物命名委员会已于 1981 年末提出了矿物名称修正表草案，着手对矿物名称进行整理和修正。

表 2.5.2 矿物命名举例

命名依据	举例
成分	钨锰铁矿$(Mn,Fe)WO_4$，银金矿(Au,Ag)
性质	重晶石（相对密度大），方解石（具菱面体解理），孔雀石（孔雀绿色），天青石（天青色）、蛇纹石（颜色斑驳如蛇皮）
成分及性质	赤铜矿（Cu_2O、红色），黄铜矿（$CuFeS_2$、铜黄色），辉锑矿（Sb_2S_3、金属光泽），方铅矿（PbS、立方体晶形及解理），磁铁矿（Fe_3O_4、具强磁性）
形态	石榴子石（四面三八面体或菱形十二面体状似石榴子），十字石（双晶呈十字形）
形态及物性	红柱石（红色、柱状晶体），绿柱石（绿色、柱状晶体）
地名	香花石（发现于我国香花岭），高岭石（我国江西高岭地方产者最著名）
人名	章氏硼镁石（英文名 Hungchstone 可译为鸿钊石）（为纪念我国地质学家章鸿钊而命名）

随着矿物研究手段的改进，新矿物种的发现逐年增多。据统计，若以 20 年为一个计算单位，则新矿物的发现在 1800～1819 年为 87 种，1820～1919 年为 185 种，1920～1939 年为 256 种，1940～1959 年为 347 种。而 1960～1973 年的 13 年间竟发现了 575 种新矿物。1973 年后平均每年发现的新矿物约为 40～50 种。新中国成立以后，随着我国地质事业的发展和矿物学研究的深入，从 1957～1981 年我国发现的新矿物已近 40 种，特别是近年来，我国新矿物的发现逐渐增多，这一研究领域正在获得迅速的发展。

6　硅酸盐矿物

硅酸盐类矿物包括所有含硅酸根的矿物，这类矿物在自然界分布非常广泛，目前已发现的矿物约有 800 多种，占已知矿物总数的 1/3～1/4，占地壳的总重量的 75%～80%，它们是岩浆岩和变质岩的最主要的造岩矿物，同时，也是工业、国防上重要的非金属矿物资源，尤其是陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料工业，如云母、石棉、高岭石、长石、滑石等，又是一系列稀有元素的重要矿物原料，如 Be(绿柱石)、Zr(锆石)等。

6.1　晶体化学特点

6.1.1　化学成分

组成硅酸盐矿物的元素见表 2.6.1。

表 2.6.1　形成硅酸盐矿物的元素

	ⅠA	ⅡA	ⅢB	ⅣB	ⅤB	ⅥB	ⅦB	Ⅷ	ⅠB	ⅡB	ⅢA	ⅣA	ⅤA	ⅥA	ⅦA	0
1	H															
2	Li	Be									B	C	N	O	F	
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe Ni	Cu	Zn			As			
5		Sr	Y	Zr	Nb							Sn	Sb			
6	Cs	Ba	La									Pb	Bi			
7				Tn		U	Ce									

组成硅酸盐矿物的最主要元素有 O、Si、Al、Fe、Ca、Mg、Na、K，其次是 Mn、Ti、B、Be、Zr、Li、H、F 及其他元素等。由表中可看出，组成硅酸盐的元素主要为惰性气体型离子，其次为过渡型离子，而具铜型离子的元素则很少见。

作为阴离子的，除去主要由 Si 和 O 组成的络阴离子外，还可以出现附加阴离子 O^{2-}、OH^-、F^-、Cl^- 以及 $S^{2-}$$[CO_2]^{2-}$、$[SO_4]^{2-}$ 等，此外，还可以有 H_2O 分子参加。

组成硅酸盐矿物的元素虽然不多，但硅酸盐矿物种类较多，这主要是由于内部构造复杂及类质同象现象广泛所致。

6.1.2 晶体构造

在硅酸盐矿物的晶体结构中，硅氧四面体[SiO_4]是它们的基本构造单位，即每一个硅离子都被四个氧离子所包围，而四个氧离子则分布于四个角顶，如图 2.6.1 所示。

由于 Si^{4+} 离子的化合价为 4 价，配位数为 4，它赋于每一个氧离子的电价为 1，即等于氧离子电价的一半，氧离子另一半电价可以用来联系其他阳离子，也可以与另一个硅氧四面体的硅离子相连。因此，在硅酸盐结构中[SiO_4]四面体既可以孤立地被其他阳离子包围起来，也可以彼此以共用角顶的方式联结起来形成各种形式的硅氧骨干，即每一个硅氧四面体可与一个、二个、三个，甚至四个硅氧四面体相连，从而形成多种复杂的络阴离子，因而导致了硅酸盐晶体构造的复杂性和多样性。

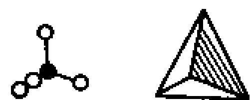


图 2.6.1 [SiO_4]$^{4-}$ 硅氧四面体

另外，[SiO_4]四面体的每一个顶点，即 O^{2-} 最多只能为两个[SiO_4]四面体所共用，也就是两个[SiO_4]四面体只能共用一个角顶。两个[SiO_4]四面体之间，只能以共角顶，而不能以共棱或共面相联结，而且当共角顶时，SiO—Si 键角位近 180°愈稳定。

硅酸盐晶体中，氧离子与硅离子的结合较之与其他离子结合牢固得多，在各种构造中，四面体的大小十分相近，Si—O 距离为 1.60±0.01Å，Si—O 之间的化学键介于离子键与共价键之间，其硅离子与氧离子的比值不同，其结构也不同，Si^{4+} ∶ O^{2-} 由 1∶4 向 1∶2 变化，硅酸盐的结构也愈来愈复杂。

根据硅氧四面体在晶体构造中连接方式的不同，可分为以下五种类型：

1. 岛状构造

这是硅酸盐构造中最简单的一种构造类型，其表现形式有两种：

①孤立的硅氧四面体[SiO_4]$^{4-}$　如图 2.6.1 所示，为孤立的硅氧四面体，硅离子的正 4 价平均分给 4 个氧离子，每个氧离子分得 1 个正价，抵消了氧离子的 1 个负价，剩余的 1 个负价用来与络阴离子团外的金属阳离子结合，自身并不相连，因而呈孤立的岛状。

这种孤立的硅氧四面体的氧离子，其一半电价被中和，还剩余一半未中和，称为活性氧，其 4 个氧全部为活性氧。络阴离子总电价为负 4 价，它必须借助于金属阳离子的结合，来达到电性中和，如锆石 Zr[SiO_4]、镁橄榄石 Mg_2[SiO_4]。

②双硅氧四面体[SiO_4]$^{6-}$　如图 2.6.2 所示，两个硅氧四面体以 1 个公共氧连接，该公共氧的电荷为两个硅所中和，这种离子电价被中和的氧称为惰性氧。另外 6 个活性氧可用来联系其他阳离子，因此这种络阴离子的总电荷为负 6 价。如异极矿 Zn_4[Si_2O_7][OH]$_2$ · H_2O。

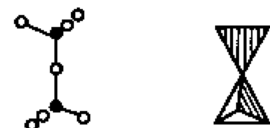


图 2.6.2 [Si_2O_7]$^{6-}$ 双硅氧四面体

此外，孤立四面体和双四面体还可以同时存在于同一晶体结构中，组成了两者的混合类型。例如绿帘石 Ca_2[Al,Fe]$_3$[SiO_4][Si_2O_7]O(OH)。

2. 环状构造

[SiO_4]四面体以角顶联结形成封闭的环，根据硅氧四面体的数目及所联成的形状，可以有三方环、四方环和六方环。环内每一硅氧四面体均以两个角顶分别与相邻的两个硅氧四面体连接，而环与环之间则依靠其他金属阳离子来连接。

三方环：如图 2.6.3(*a*)所示，有 3 个惰性氧，6 个活性氧，络阴离子用[Si_3O_9]$^{6-}$ 来表示，如

蓝锥石 $BaTi[Si_3O_9]$，硅灰石 $Ca_3[Si_3O_9]$。

四方环：如图 2.6.3(*b*)所示，有 4 个惰性氧，8 个活性氧，络阴离子用$[Si_4O_{12}]^{8-}$来表示，如斧石$(Ca,Mn,Fe)_3Al_2[Si_4O_{12}](BO_3)(OH)$。

六方环：如图 2.6.3(*c*)所示，有 6 个惰性氧，12 个活性氧，络阴离子用$[Si_6O_{18}]^{12-}$来表示，如绿柱石 $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$。

此外，环还可以重叠起来形成双环，如整柱石 $KCa_2AlBe_2[Si_{12}O_{30}]$的晶体结构就是六方双环。

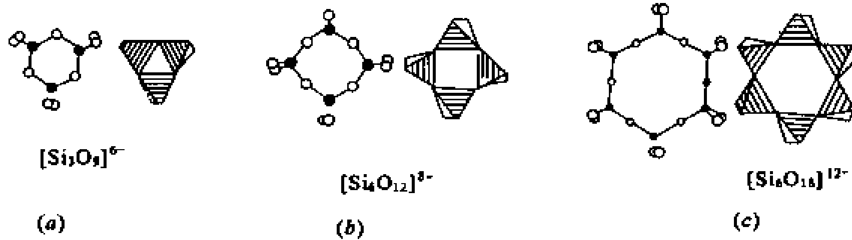


图 2.6.3 环状结构

(*a*) 三方环；(*b*) 四方环；(*c*) 六方环

3. 链状构造

硅氧四面体以角顶联结成沿一个方向无限延伸的链，其中常见者有单链和双链。此外，尚有三重、四重、五重等型式的链，但较少见。

①单链 单链系每一硅氧四面体以两个角顶分别与相邻的两个硅氧四面体连接成一向无限延伸的连续链(图 2.6.4)，如透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$，单链是$[Si_2O_6]_\infty$。也就是它的重复周期是$[Si_2O_6]$。另外根据重复周期和联结方式还有如硅灰石($Ca_3[Si_3O_9]$)，单链$[Si_3O_9]_\infty$，蔷薇辉石$(CMn,Ca)_5[Si_5O_{15}]$单链$[Si_5O_{15}]_\infty$，如图 2.6.5 所示。

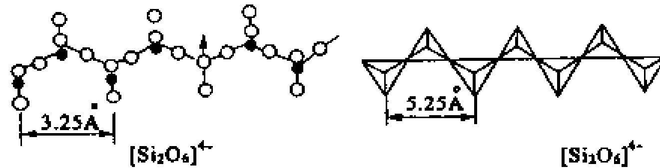


图 2.6.4 单链透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$

在辉石的单链中，它是每两个硅氧四面体重复一次，而在硅灰石和蔷薇辉石的单链中，则分别为每 3 个和每 5 个硅氧四面体重复一次。

在单链每 1 个硅氧四面体中，位于两个角顶的氧离子由于与两个硅氧四面体相连在电性上中和成为惰性氧。而其余两个氧离子仍各具有一单位的自由电价，成为活性氧，借此与金属阳离子相连接。

②双链 犹如两个单链相互连接而成。

硅氧四面体中有两个角顶公用氧和 3 个角顶公用氧连接而成一向无限延伸的连续双链。在延伸方向上表现出闭合六方环，环环相连，无限延长，例如角闪石(透闪石 $Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$ 中的双链(如图 2.6.6)，此种双链可以看成是辉石的单链通过一个镜面的反映成双而得，双链的阴离子可

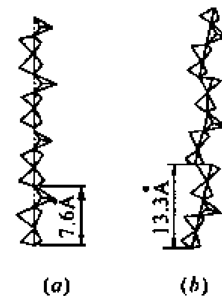


图 2.6.5

(*a*) 硅灰石单链$[Si_3O_9]$

(*b*) 蔷薇辉石单链$[Si_5O_{15}]$

以用$[Si_4O_{11}]^{6-}$来表示。

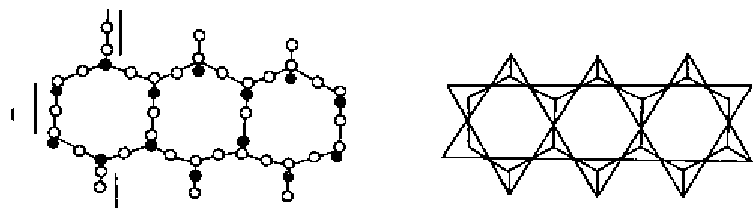


图 2.6.6 透闪石双链$[Si_4O_{11}]^{6-}$

双链结构除了角闪石中的双链以外，还存在有其他形式的双链，现列举几种如下：

a)硬硅钙石($Ca_6[Si_6O_{17}](OH)_2$)，双链$[Si_6O_{17}]$它可以被看做是硅灰石单链通过1个二次轴的旋转而得(图 2.6.7(*a*))；

b)矽线石($Al[AlSiO_5]$)，双链$[AlSiO_5]$在硅氧四面体中一半的$[SiO_4]$四面体为$[AlO_4]$四面体所代替(图 2.6.7(*b*))；

c)星叶石$(K,Na)_3(Fe,Mn)_7Ti_2Si_8O_{24}(O,OH)_7$，双链$[Si_4O_{12}]$，此种双链的特点是双链的轴线部分实为一辉石单链，而其分支部分作双四面体状(图 2.6.7(*c*))。

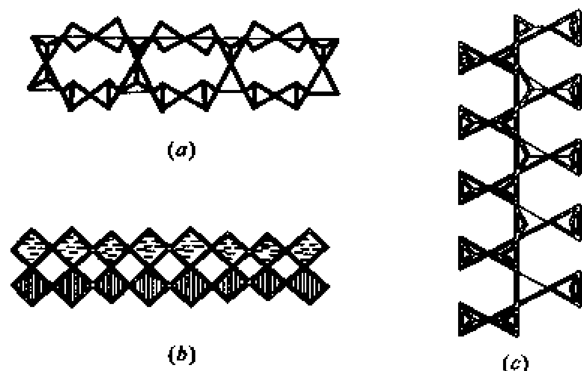


图 2.6.7

(*a*) 硬硅钙石双链$[Si_6O_{17}]$

(*b*) 矽线石双链$[AlSiO_5]$

(*c*) 星叶石双链$[Si_4O_{12}]$

无论是单链或双链，链与链之间都是通过其他金属阳离子而相互联系。

4. 层状构造

每个硅氧四面体均以3个角顶分别与相邻的3个硅氧四面体相连接，形成向两个方向无限延伸的平面层(如图 2.6.8 所示)，层与层之间靠金属阳离子联系。在此种类的构造中，有3个角顶上的氧离子都是为相邻接的两个四面体所公有的。其电荷已达到平衡，但另一个角顶上的氧离子其电荷则尚未达到平衡，处于活性状态。假如我们把层状构造划分为若干相等部分进行研究，每个相等单位中有4个硅和10个氧，则活性氧的总和为4，因此它的络阴离子的化学式为$[Si_4O_{10}]_n^{4n-}$。活性氧可指向一方也可以指向相反的方向。$[SiO_4]$四面体也可有不同的联结方式，因此层状构造亦有多种形式，现仅列举两种如下：

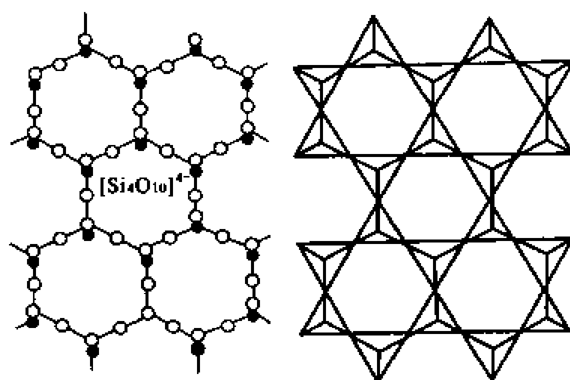


图 2.6.8 滑石的层状构造

①滑石($Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$) 图 2.6.8 四面体彼此以3个角顶相联结形成六角形的网，它可以看成是由一系列的角闪石型双链相互形成的层，活性氧指向一边。

②鱼眼石($KCa_4[Si_4O_{10}]_2F\cdot 8H_2O$) 图 2.6.9$[SiO_4]$四

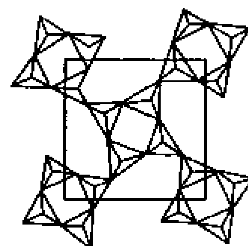


图 2.6.9 鱼眼石的层状构造

面体彼此以3个角顶相联结形成四方形的网，活性氧分别指向网的上下两边。

5. 架状构造

此构造中每个硅氧四面体角顶全部与相邻的四面体连接，形成向三度空间无限扩展的骨架(图2.6.10)，此时，其中的每个氧离子都为相邻的两个四面体所公有，电荷已达到平衡，均为惰性氧。石英(SiO_2)族矿物即具此种结构。但在硅酸盐中，这种骨架并不表现为全部硅氧四面体所构成，而必须有一部分的硅氧四面体被铝氧四面体$[AlO_4]^{5-}$(个别情况下可为铍氧四面体$[BeO_4]^{6-}$等)所代替，这样才能出现过剩的负电荷与其他阳离子结合，形成铝硅酸盐。这种架状络阴离子的化学式一般可以写作$[Si_n\text{-}xAl_xO_{2n}]^{x-}$。

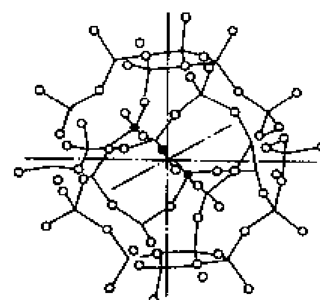


图2.6.10 架状构造的硅氧四面体结构(方钠石结构中的硅氧四面体骨架)

由于在架状构造中氧离子剩余电荷低，存在着较大的空隙，因此，在架状硅酸盐中的阳离子，都是那些低电价、大半径、高配位数的离子，有时并有附加阴离子和水分子的存在。例如正长石$K[AlSi_3O_8]$，钙长石$Ca[Al_2Si_2O_3]$，钠霞石$Na[AlSiO_4]$，方钠石$Na_8[AlSiO_4]_6Cl_2$等。

综上所述，硅酸盐晶体构造5种类型可归纳成表2.6.2。

表2.6.2 硅酸盐晶体构造类型

构造类型	$[SiO_4]$共用O^{2-}数	形　状	络阴离子	Si∶O	实　例
岛状	0	四面体	$[SiO_4]^{4-}$	1∶4	镁橄榄石 $Mg_2[SiO_4]$
	1	双四面体	$[Si_2O_7]^{6-}$	2∶7	硅钙石 $Ca_3[Si_2O_7]$
环状	2	三方环	$[Si_3O_9]^{6-}$	1∶3	蓝锥石 $BaTi[Si_3O_9]$
	2	四方环	$[Si_4O_{12}]^{8-}$		包头矿 $Ba_4[(TiNb)_8(Si_4O_{12})10_{16}]Cl$
	2	六方环	$[Si_6O_{18}]^{12-}$		绿柱石 $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$
链状	2	单链	$[Si_2O_6]^{4-}$	1∶3	透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$
	2,3	双链	$[Si_4O_{11}]^{6-}$	4∶11	透闪石 $Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$
层状	3	平面层	$[Si_4O_{10}]^{4-}$	4∶10	滑石 $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$
架状	4	骨架	$[SiO_2]$	1∶2	石英 SiO_2
			$[(Al_xSi_{n-x})O_8]^{x-}$		钠长石 $Na[AlSi_3O_8]$

必须说明的是：在某些硅酸盐构造中还可以存在两种不同的络阴离子，除前面列举了绿帘石情况外，我国在葡萄石$Ca_2Al[AlSi_3O_{10}](OH)_2$晶体结构中，发现了由3层$[SiO_4]$四面体组成，中间的一层$[SiO_4]$四面体与4个$[SiO_4]$四面体相连。因此，这种层状构造带有架状构造的特点，可视为层状构造与架状构造的过程形式。

6.1.3 铝的作用

铝在硅酸盐构造中起着双重作用，一种是铝呈四次配位，铝替代部分$[SiO_4]$四面体中的硅，形成$[AlO_4]$四面体，与$[SiO_4]$一起参与构成络阴离子，由此组成的硅酸盐称为铝硅酸盐，如钠长石$Na[AlSi_3O_8]$。另一种是铝呈六次配位，可以以金属阳离子形式存在，通常构成Al-

O_6配位八面体，它们与络阴离子相结合，由此组成的硅酸盐称为铝的硅酸盐，如高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$。在一个晶体结构中，如果同时存在有上述两种形式的铝时，则可称为铝的铝硅酸盐，如白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$。

铝具有双重作用，是因为铝离子的半径大小所决定，Al^{3+} 半径为 0.57Å，O^{2-} 离子半径为 1.36Å，它们的比值为 0.42，近似于配位数为 4 和 6 之间的数值 0.414，因而决定了 Al^{3+} 离子具有 4 次和 6 次配位的两种可能，亦即铝在硅酸盐中具有双重作用。

$[AlO_4]$四面体的体积稍大于$[SiO_4]$四面体，一般说来不是一种稳定的配位形式，特别是温度低的时候更不稳定，易于转变为配位数为 6 的形式，如钙长石 $Ca[Al_2Si_2O_8]$转变为葡萄石 $Ca_2Al[AlSi_3O_{10}](OH)_2$，此时钙长石的一半的 Al 由四面体配位转变为八面体配位，而钙长石更易转变为绿帘石 $Ca_2(Al,Fe)_3O(OH)[SiO_4][Si_2O_7]$，使 Al 全部处于八面体配位中，而成为最稳定的形式。

$[AlO_4]$四面体在高温富铝的条件下产生，如高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ 和蓝晶石 $Al_2[SiO_4]O$（其中 Al^{3+} 成六次配位）等矿物在高温（1000～1500℃）条件下，可以部分地转变为夕线石 $Al[AlSiO_5]$（其中部分的 Al 为四次配位）。

$[AlO_4]$四面体这一不稳定的配位形式，在构造中需要由$[SiO_4]$四面体的支持，因此，通常是在具有孤立$[SiO_4]$四面体的硅酸盐构造中，$[AlO_4]$难以存在，只有在具有无限延伸的硅氧四面体（链、层、架）的构造中，Al 替代 Si 才有可能。而在具有架状构造的硅酸盐中，Al 替代 Si 是必须的，Si：Al 最高可达 1：1。在硅氧四面体中按照 Al 替代 Si 的难易可以列出如下顺序：单链—双链—层状—架状。

在晶体构造中，两个$[AlO_4]$不能相连，否则将使电荷难以平衡，同时两个不稳定配位多面体相连将使构造的不稳定性增加，因此，在$[AlO_4]$四面体之间一定要有$[SiO_4]$四面体隔开，而 Al 替代 Si 的数目不能超过硅氧四面体中 Al 和 Si 的总数的一半。

当硅氧四面体中 Al：Si 等于 1：1 时，$[AlO_4]$四面体与$[SiO_4]$四面体将相间排列，一般来讲，Al 和 Si 在结构中的分布可以是无序的，也可以是有序的。

$[AlO_4]$四面体是构造中的弱点，它常决定矿物的某些性质，如含有$[AlO_4]$的硅酸盐比只含有$[AlO_6]$的硅酸盐更易被酸所破坏，铝硅酸盐比铝的硅酸盐具有较小的比密度、硬度以及较低的折光率。

6.1.4 附加阴离子

在硅酸盐构造中，除了上述硅氧形成的各种络阴离子外（包括铝氧），还常有一些附加的阴离子，最常见的有 F^-、Cl^-、O^{2-}、$(OH)^-$，有时还可以有$[CO_3]^{2-}$、$[SO_4]^{2-}$、$[PO_4]^{3-}$、S^{2-}，这些附加阴离子可以用来平衡电价、充填空隙（如方钠石）或与 O^{2-} 共同形成最紧密堆积（如黄玉）。其中$(OH)^-$加入硅酸盐晶体构造中，除了与一定的阳离子的存在有关之外，还与硅酸盐的构造形式有关。一般情况是具双链及层状构造的硅酸盐最容易接纳$(OH)^-$，而在具单链及架状构造的硅酸盐中$(OH)^-$则难以加入，$(OH)^-$有时也可替代$[SiO_4]$四面体中的 O^{2-}。但后者如系两个四面体角顶上公用的 O^{2-}，则不能被$(OH)^-$所取代。

各种附加阴离子之间的类质同象代替也是常见的现象，特别是在$(OH)^-$、F^-、O^{2-}之间，而$(OH)^-$与 F^-之间的代替几乎没有什么限制，而 O^{2-}与$(OH)^-$、O^{2-}与 F^-之间的类质同象代替，只有在电价能够补偿的条件下才能发生。

较大的附加阴离子 Cl^-、$[CO_3]^{2-}$、$[SO_4]^{2-}$ 等皆存在于架状构造的空隙中。

6.1.5 硅酸盐中的"水"

硅酸盐晶体结构中还常可存在水分子，而且存在的方式和形式是多种多样的，常以 $(OH)^-$、H_2O、$(H_3O)^+$ 的形式存在，$(H_3O)^+$ 实质上已不是水分子，而是一种带正电荷的阳离子，此种离子在某些层状硅酸盐矿物中少量存在，且易转变为 $H^+ + H_2O$。在层状硅酸盐矿物水化过程中，这些离子可以替代被带出的碱金属离子，亦即 $(H_3O)^+ \rightarrow K^+$、Na^+。

H_2O 在硅酸盐中大多数呈沸石水或层间水（沸石族矿物及蒙脱石等层状结构矿物），只有在少数硅酸盐中才以结晶水（异极矿）的形式存在。

硅酸盐矿物中沸石水或层间水的逸失，一般并不引起晶体结构的破坏，甚至部分或全部结构水的逸失，也可能并不引起结构的明显变形，其原因就在于决定这些矿物稳定性的主要因素是络阴离子所组成的骨架或层，而水分子的存在与否，对结构的影响不如在其他矿物中那样显著。

硅酸盐中的"水"，起着充填空隙或水化阳离子作用。

6.1.6 化学键

硅酸盐矿物的化学键主要为离子键和共价键，硅氧形成的络阴离子内部主要为共价键，而络阴离子与阳离子结合的键力为离子键，层状构造硅酸盐矿物尚有分子键。

6.1.7 离子堆积

在硅酸盐构造中，离子堆积情况亦与硅氧四面体 5 种构造类型密切相关。

①在具有孤立 $[SiO_4]$ 四面体的硅酸盐构造中，离子常按最紧密方式排列，当阳离子的配位数为 4 和 6，阴阳离子半径的比值也与配位数相符合的情况下，氧离子可成最紧密堆积，如黄玉、蓝晶石、橄榄石，如果阳离子的配位数大于 6，则使氧离子不能按最紧密方式排列，但整个构造仍作最紧密堆积，如石榴子石。

②在具有环状构造的硅酸盐中，环与环之间作平行排列，而且尽可能地排列得最紧密，但氧离子不是按最紧密堆积的方式分布，如绿柱石、电气石。

③在具有链状及层状构造的硅酸盐中，硅氧四面体彼此作平行排列，并尽可能地作最紧密堆积，如辉石、角闪石、云母。

④在具有架状构造的硅酸盐中，离子不作最紧密堆积，如长石。

6.1.8 阳离子配位

构成硅酸盐矿物的主要阳离子依常见的配位数区分时，可分下列几类：

配位数为 4：B^{3+}、Be^{2+}、Al^{3+}、Ti^{4+}、Fe^{3+}、Zn^{2+}；

配位数为 6：Al^{3+}、Ti^{4+}、Mg^{2+}、Li^+、Zr^{4+}、Mn^{2+}、Ca^{2+}、Fe^{2+}、Sc^{3+}；

配位数为 8：Zr^{4+}、Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}。

此外还有配位数为 12 的 K^+ 和 Ba^{2+}，以及特殊的配位数如 5、7、9 等，这些仅见于个别矿物中。

从上列情况可以看出，一种离子可以有几种不同的配位数。对于同一种阳离子来讲，配位

数增加会促使其晶体的密度加大，与此相关，会使折射率提高，比密度增加，晶格强度增大。

阳离子的配位数取决于阴阳离子半径的比值、离子的电子层的结构以及矿物的生成条件（温度、压力和介质成分的特点）。

惰气型离子的配位数适应阴阳离子半径的比值，常倾向于具有较高的配位数。铜型离子，常需考虑共价键的因素，一般配位数较低。增加介质的碱性，即增加强金属离子的浓度有促进生成低配位数晶格的作用，如碱性的增高可促使铅的配位数降低，由6降至4；增高温度常促使配位数降低，如使Al的配位数由6降至4(长石中)；压力的增加常促使生成配位数较高的构造等。

由于硅酸盐矿物中络阴离子的形式多样，因而晶体结构的类型和特性也就不同，有的松散、有的紧密，有的在某些方向或某个方向上紧密，而在另外方向上则较松散，这样就要求有不同大小的阳离子来填塞其空隙。另外，又由于硅氧四面体相互连接方式的不同，因而还会出现不同的电价，如果$[SiO_4]$的所有角顶均彼此连接起来，其自身的正、负电荷已经平衡，即使能够形成空隙，也无须其他阳离子进入，石英的情况便是这样。根据这两方面的因素可知，在硅酸盐构造中，络阴离子内部硅氧四面体的连接方式愈是复杂，结构便愈疏松，留下的空隙可以很大，而络阴离子中剩余的负电荷愈少，因而当结构由岛状向架状过渡时，一般可以看到阳离子的出现情况有所不同。

岛状硅酸盐中，可以出现配位数偏低，正电荷偏高的阳离子，如Zr^{4+}、Ti^{4+}、Sc^{3+}等，他们可以形成一些独立矿物如锆石、榍石、钪钇矿等。但这些离子却不会成为架状硅酸盐中的主要阳离子，更难以形成独立的架状硅酸盐矿物，如果存在，也只是以少量的类质同象置换方式取代其他的某些离子而已，而K^+、Na^+、Ba^{2+}、Ca^{2+}等较大的阳离子，尤其是Rb^+、Cs^+、Ba^{2+}等特大的离子，往往填塞在架状硅酸盐所形成的特大空隙中。这些元素如果形成独立的硅酸盐矿物，也多属于架状构造，如天河石(含铷的微斜长石)、铯榴石、钡长石、钠沸石或钡沸石等。由于这些离子具有电价低、配位数高的特点，很能适应于架状硅酸盐的结构特性，至于中间类型的离子如Fe^{2+}、Mg^{2+}、Al^{3+}等，半径大小与电价的大小，均属中间状态，所以分布范围就比较宽广，在岛状中可以存在，在链状、层状中则大量出现，即使到架状硅酸盐中也能见及。

在具有架状构造的硅酸盐中，由于硅氧结构比较牢固，参加其中的阳离子种类也较少，一般阳离子配位对此结构不起控制作用，而在具有岛状构造的硅酸盐中，硅氧四面体孤立分布，其结构主要决定于阳离子配位的情况。

6.1.9 类质同象

硅酸盐中类质同象代替现象极为普遍而多样，从而使硅酸盐的成分进一步复杂化，除了等价的类质同象外，还有异价类质同象，一些完全的类质同象代替常使矿物形成完全的类质同象系列：如橄榄石系列$Mg_2[SiO_4]$-$Fe_2[SiO_4]$，石榴子石系列$Mg_3Al_2[SiO_4]_3$-$Fe_3Al_2[SiO_4]_3$，透辉石-钙铁辉石系列$CaMg[Si_2O_6]$-$CaFe[Si_2O_6]$，斜长石系列$Na[AlSi_3O_8]$-$Ca[Al_2Si_2O_8]$等。

硅酸盐矿物中类质同象其离子相互代替的范围也常与硅氧四面体类型有关，例如，具岛状构造的橄榄石$A_2^{2+}[SiO_4]$，$A^{2+}=Ni^{2+}$、Mg^{2+}、Co^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}、Cd^{2+}、Ca^{2+}、Sr^{2+}、Ba^{2+}，相互代替的离子半径变化范围在0.68(Ni^{2+})～1.44Å(Ba^{2+})之间，最大差值达0.76Å。

具链状构造的普通角闪石$A_2B_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$，$A=Ca^{2+}$、$Na^+$、$K^+$，$B=Mg^{2+}$、$Fe^{2+}$、$Fe^{3+}$、$Al^{3+}$，A组分中离子大小变化范围为1.08($Ca^{2+}$)～1.46Å($K^+$)，相差0.38Å；B组分中

离子大小变化范围为 0.61(Al^{3+})～0.80Å(Mg^{2+})，相差 0.19Å。

具层状构造的云母 $AB_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$，$A=K^+$、Na^+，$B=Mg^{2+}$、Fe^{2+}、Mn^{2+}（或为 Li^+、Al^{3+}），B 组离子大小变化范围为 0.61(Al^{3+})～0.80Å(Mg^{2+})，相差 0.19Å。

具架状构造的斜长石系列成分为 $Na[ASi_3O_8]$～$Ca[Al_2Si_2O_8]$，相互代替的 Na^+ 与 Ca^{2+} 离子半径差值仅为 0.04Å。

由以上情况可以看出，不同大小的离子的代替范围在岛状构造的硅酸盐中最广泛，而在具链状、层状到架状构造的硅酸盐中，离子代替范围逐渐缩小，这说明了在不破坏原来晶体结构的前提下，岛状构造与阳离子配位多面体之间的调整是最易实现的。

6.2 形态与物理性质

由于硅酸盐矿物有上述的晶体结构、组成等特点，因而表现在形态上及物理性质方面亦具不同的特性。

6.2.1 形态

硅酸盐矿物的晶体形态，取决于硅氧四面体类型和其他阳离子配位多面体，特别是 Al—O 八面体的连接。

岛状构造硅酸盐在形态上常表现为三向等长的粒状，如石榴子石、橄榄石等，如果在不同方向上出现键力的差异时，则可以表现为非粒状，如蓝晶石呈片柱状。

环状构造硅酸盐中，由于垂直方向上环与环之间的联结力一般较强故呈柱状形态，柱的延长方向垂直于环状结构的平面，柱状晶体往往属六方晶系或三方晶系。如绿柱石、电气石。

链状构造硅酸盐中，都是呈平行于链的方向的柱状或针状形态，如辉石、角闪石、角闪石石棉等。

层状构造硅酸盐中，常呈板状、片状，甚至鳞片状，延展方向平行于硅氧四面体层，如云母、绿泥石、葡萄石。少数层状构造作纤维状，是由于结构卷曲所致。

架状构造硅酸盐形态比较复杂，主要取决于$[SiO_4]$和$[AlO_4]$骨架内部的连接形式，若结构内部有的沿一个方向连接力特强则相似于链状，从而形成平行此链的柱状形态。有的在某一平面内连接力特强而相似于层状，有的则呈典型的架状，所以晶形有呈三向等长的方沸石、菱沸石，有呈片状的片沸面，也有呈柱状，乃至纤维状的钠沸石和钙沸石。

6.2.2 物理性质

硅酸盐矿物的光泽、颜色、条痕、透明度等有关光学性质与其结构以及所含原子的种别有密切关系，硅酸盐可以有不同的透明度，但在薄片中没有不透明者，呈玻璃-金刚光泽，其颜色决定于所含色素离子。一般说来，含铁族元素的硅酸盐往往带色，架状构造者含色素离子量较少，多呈浅色，而其他构造类型所含色素离子较多，可以是深色的。尽管颜色深浅不同，但条痕都很浅，呈白色或灰白色，极少例外。

硅酸盐矿物的解理亦与构造类型有关，岛状硅酸盐之三向等长者，一般无完全解理，链状者多为平行于链延长的方向产生柱状解理。环状者一般解理不好，如有解理，则属柱状或平行于底轴面的解理。层状者几乎无例外地都具有极完全的底面解理。架状者，则视其格架之属

于何种类型而有所不同，其完全程度也视键力情况而不同，如长石有平行 X 轴的两组解理，是因为长石架状构造中有平行 X 轴的比较坚强的链。

比密度的大小决定于结构紧密程度和主要阳离子的原子序数的大小，岛状者，堆积紧密，主要阳离子为原子序数偏高的 Zr^{4+}、Zn^{2+}、Ti^{4+}，故比密度大，如锆石比密度达 4。架状者，结构疏松，空隙大，主要阳离子多系半径大、而原子序数小的元素，如 K^+、Na^+、Ca^{2+} 等，故比密度小，例如长石、沸石的比密度不超过 2.8(钡长石除外)。至于介于其间的链状、层状、环状硅酸盐，其比密度也介于其间，约为 3～3.5。含水的硅酸盐比密度较小。

硬度一般均较高，与阳离子的电荷、离子半径以及配位数有关，硅酸盐硬度与其他类矿物比较，仅次于无水氧化物。只有层状构造硅酸盐，因层与层之间的连接力极弱，因而使其硬度降低很多，最低者如滑石、高岭石等仅 1 左右，云母族矿物升高到 2.5 左右，到脆云母族时，由于层间出现了二价阳离子，连接力加强，硬度可升高到 5 左右。岛状构造硅酸盐，由于结构紧密，故硬度最高，可达 6～8；环状者大体相似，链状者降低，在 5～6 之间；而在架状者，结构虽疏松，可是由于$[SiO_4]$四面体的连接都很牢固，故硬度并不低，仍在 5～6 之间，若构造中有水的存在，常使硬度降低。

6.3 成　　因

硅酸盐的成因类型是多种多样的，从岩浆作用到表生作用、变质作用等所有成矿成岩的过程中，均普遍地有硅酸盐矿物的形成，包括有岩浆型、伟晶型、热液型、接触交代型、区域变质型以及表生作用等。就岩浆作用而言，随着结晶分异作用的演化发展，其结晶顺序有自岛状经链状向层状及架状过渡的趋势。

表生的硅酸盐广泛分布于风化壳中，是由内生的硅酸盐在 CO_2、O_2 地表水的作用下分解而成，其大量存在的粘土矿物，绝大多数属于层状构造硅酸盐。如果硅酸盐矿物抵抗风化力特强者，则可以成为砂矿或者成为沉积岩中的碎屑物质，如石榴子石、锆石等。显然，这些碎屑物质中以岛状结构占优势，这也与其结构及组成成分有关。至于长石砂岩中的长石碎屑，反映了在特殊的沉积环境下，即气候条件干旱，而且是急速堆积，使长石不易被风化。另外，砂岩中的白云母鳞片，也是常见，是由于白云母的化学性质比较稳定，其鳞片可以顺着水流漂浮较远，最终才沉积下来。

6.4 分　　类

硅酸盐矿物按结构中络阴离子不同，分为 5 种类型，因此在分述中，也按照这 5 种类型，相应地将硅酸盐分成 5 个亚类，即：

①岛状结构硅酸盐亚类；

②环状结构硅酸盐亚类；

③链状结构硅酸盐亚类；

④层状结构硅酸盐亚类；

⑤架状结构硅酸盐亚类。

我们在分述各矿物时，就按照这 5 个亚类分别论述，但对每亚类中各矿物，并不作全面介

绍，只选择有关的矿物讲授。

6.5 岛状结构硅酸盐亚类

本亚类矿物种族较多，其组成成分特征是络阴离子以[SiO_4]为主，极少被[AlO_4]所替换，仅个别矿物如钙铝黄长石的结构中，才有[AlO_4]四面体，而称为铝硅酸盐。其次是阳离子远较其他亚类的硅酸盐矿物复杂多样。除了经常出现的 Ca、Mg、Fe、Mn、Al 等外，还可有 Nb、Ta、Zr、Hf、TR、U、Th 以及 Cu、Pb、Zn、Sn 等。而在其他亚类中分布较普遍的 K、Na 等，在本亚类中则不占主导地位，仅出现在个别矿物中。

6.5.1 橄榄石族

本族包括一组成分类似，同属斜方晶系的矿物，橄榄石族矿物的化学式为 X_2[SiO_4]，X 通常为 Mg、Fe、Mn，还可能为 Ni、Co、Zn 等，由于它们离子半径近似而形成了十分广泛的类质同象代替。

自然界中，最常见的是以镁橄榄石 Mg_2[SiO_4]及铁橄榄石 Fe_2[SiO_4]为两个端员组分的完全类质同象系列的中间成员——橄榄石$(Mg,Fe)_2$[SiO_4]，又称镁铁橄榄石。此外，还有锰橄榄石 Mn_2[SiO_4]与铁橄榄石也能形成类质同象，但不完全，锰铁橄榄石为中间成员，至于锰橄榄石与镁橄榄石之间类质同象置换范围更窄。

对镁橄榄石—铁橄榄石系列，根据化学成分划分为：

镁橄榄石：理论组成为 MgO 57.1%，SiO_2 42.9%。

橄榄石：MgO 40%～50%，FeO 8%～12%（少数达 20%），NiO 0.1%～0.3%，CoO 0.01%，有时还有 Mn。

铁橄榄石：FeO 76%，MgO 不超过百分之几，往往含有相当量的 MnO，有时含 ZnO、Fe_2O_3，Fe_2O_3 是 FeO 部分氧化的产物。

纯镁橄榄石和纯铁橄榄石较少见。

橄榄石$(Mg,Fe)_2$[SiO_4]

[化学组成]　含 MgO 40%～50%，FeO 8%～20%，并常含有 Mn、Ni、Co 等元素。

[晶体参数和结构]　斜方晶系，a_0＝4.76～4.82Å、b_0＝10.20～10.40Å、c_0＝5.98～6.11Å，晶胞大小随铁含量增加而增大。

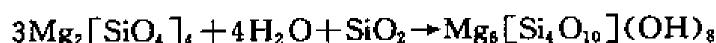
橄榄石晶格由孤立的硅氧四面体$[SiO_4]^{4-}$与金属阳离子 Mg^{2+}、Fe^{2+}等连接而成，氧离子接近于六方最紧密堆积，硅离子充填于四面体空隙，形成四次配位。二价阳离子 Mg^{2+}、Fe^{2+}则占据八面体空隙，形成六次配位。由于晶格中各方向键力近似，故呈等轴状，不具解理或仅有不完全的{010}解理。

[形态]　对称型 $3L^23PC$，晶形呈短柱状或厚板状，但晶形完整者少见，一般以粒状或块状集合体产出。

[物理性质]　橄榄绿色、黄绿色，含 Fe 愈高则颜色愈深，有时可呈绿黑色，当含 Fe 量少时（镁橄榄石）呈无色，或浅灰色（锰橄榄石），玻璃光泽，断口呈油脂光泽、贝壳状，硬度 6.5～7，比密度 3.3～3.5（随含 Fe 量增大，比密度加大），熔点高为 1320～1910℃。

[变化]　橄榄石在自然条件下，常因受热液作用，风化作用和区域变质作用而发生变化。

橄榄石受热液作用后常变为蛇纹石、菱镁矿、滑石、石英，含 Fe 量多时还可以产生磁铁矿、赤铁矿。



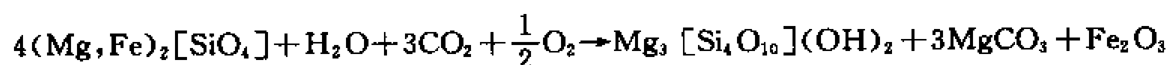
$$3Mg_2[SiO_4]_4+4H_2O+SiO_2 \rightarrow Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$$

镁橄榄石　　　　　　　　　　　蛇纹石



$$4(Mg,Fe)_2[SiO_4]+4H_2O+2CO_2 \rightarrow (Mg,Fe)_6[Si_4O_{10}](OH)_8+2MgCO_3$$

橄榄石　　　　　　　　　　　　蛇纹石　　　　　　　　　菱镁矿



$$4(Mg,Fe)_2[SiO_4]+H_2O+3CO_2+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2+3MgCO_3+Fe_2O_3$$

橄榄石　　　　　　　　　　　　　　　　滑石　　　　　菱镁矿　　赤铁矿

橄榄石受到强烈风化作用后，晶体构造被破坏，Mg 和 Si 被淋滤走，转入溶液，并在风化壳下部生成菱镁矿、蛋白石等，而铁则生成褐铁矿残留在风化壳的表部，常停积在橄榄石颗粒的表面或裂隙中，生成暗褐色薄膜。

橄榄石受区域变质作用后，可转变为角闪石，这种变化常发生在橄榄石和长石互相直接接触的时候，此时，浅绿色或无色针状角闪石就在橄榄石和长石晶体之间形成一个带。

［鉴定特征］　黄绿色，粒状，玻璃光泽，贝壳状断口，解理性差，难溶。主要产于基性、超基性岩浆岩中，以及共生矿物均可作为其特征。与绿帘石的区别是，绿帘石有沿 b 轴延伸，呈长柱状形态，与硅镁石的区别应依据光性方位的不同。

［主要用途］　①贫铁富镁的纯橄榄石或橄榄岩，可用作耐火材料、建筑材料及化学工业中，透明晶体可做宝石。②镁橄榄石可作为镁质瓷的原料。③蛇纹石可作耐火材料。④蛇纹石风化形成的石棉可作为隔热保温材料，如石棉手套、石棉瓦、窑炉缝隙中充填材料。⑤铁橄榄石可作为黑色颜料的原料。

6.5.2　石榴子石族

本族矿物类质同象现象极为广泛，因此，化学成分比较复杂，它们共同的化学式为：$A_3B_2[SiO_4]_3$。其中 A 代表二价阳离子，主要为 Mn^{2+}、Fe^{2+}、Mg^{2+}、Ca^{2+} 等，B 代表三价阳离子，主要为 Al^{3+}、Fe^{3+}、Cr^{3+} 等。由于三价阳离子的离子半径相互接近，因此彼此可发生类质同象置换，对于二价阳离子，其情况则不甚相同，Mg^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+} 具有较小的离子半径，可以彼此类质同象置换，而 Ca^{2+} 则由于离子半径较大，难以与 Mg^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+} 等置换，因此，决定了本族矿物中存在着两种类型的类质同象系列：一类是三价阳离子均为 Al^{3+}，二价阳离子不同（Mg^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}），另一类是二价阳离子均为 Ca^{2+}，三价阳离子不同（Al^{3+}、Fe^{3+}、Cr^{3+}），前者称为铝系石榴石系列，后者称为钙系石榴石系列，它们是：



铝系：
- 镁铝榴石 $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$
- 铁铝榴石 $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$
- 锰铝榴石 $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$

钙系：
- 钙铝榴石 $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$
- 钙铁榴石 $Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$
- 钙铬榴石 $Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$

另外，在自然界还有锰铁榴石 $Mn_3Fe_2[SiO_4]_3$ 存在。

［晶体参数和结构］　等轴晶系，$a_0=11.459\sim12.048$Å（$a_0=b_0=c_0$）。

［形态］　对称型 $3L^44L^36L^29PC$，常呈完好晶形，常见由菱形十二面体和四角三八面体或二者所组成的聚形，晶面上常有平行四边形长对角线的条纹，有时常呈歪晶出现，集合体为致密粒状和致密块状。

[物理性质] 颜色、比密度、折光率随成分作有规律的变化(表 2.6.3),玻璃光泽,断口油脂光泽,不平坦,无解理或平行[110]解理不完全,硬度 5.6~7.5,有脆性,比密度的大小与阳离子原子量有关,一般铁、锰含量增加,比密度增大。

表 2.6.3 石榴子石的晶格常数及主要物理性质

矿物		晶格常数	颜色	比密度	折光率
铝系	镁铝榴石	11.459	紫红、深红、玫瑰红	3.582	1.714
	铁铝榴石	11.526	褐红、橙红	4.318	1.830
	锰铝榴石	11.621	深红、橘红	4.190	1.800
钙系	钙铝榴石	11.851	黄褐、黄绿	3.594	1.734
	钙铁榴石	12.048	褐黑、褐红	3.859	1.887
	钙铬榴石	12.000	鲜绿	3.90	1.860

[鉴定特征] 根据其特有晶形、颜色及油脂光泽、高硬度等很易识别,本族中各矿物的相互区别,应进行比密度、折光率等的测定。

[用途] 利用其高硬度可作研磨材料,亦可做钟表钻石,颜色美丽透明者可做宝石。

6.5.3 锆石族

锆石(锆英石)$Zr[SiO_4]$

[化学组成] ZrO_2 67.01%(含 Zr 49.5%),SiO_2 32.99%,由于 Zr 和 Hf(铪)的化学性质很接近,所以锆石中含有一定数量的类质同象混入物 Hf、HfO_2 的含量可高达 24%,还经常含少量的 Fe、Th、U 以及 Sn、Nb、Na、Ca、Mn 等。ThO_2 的含量可达 15%,UO_2 可达 5%,目前一般认为锆石中 Zr/Hf 的比值随岩石从基性到酸性有增加之趋势。

由于锆石中存在少量放射性元素铀、钍,因而可发生玻璃化现象。玻璃化的锆石,比密度有明显的下降。只有经过高热处理,才能恢复原来的结晶状态,玻璃化的锆石晶面弯曲,称曲晶石,含水量高者(达 10%~12%)称水锆石。

[晶体参数和结构] 四方晶系,$a_0=6.59\text{Å}$,$c_0=5.94\text{Å}$,晶体结构中$[SiO_4]^{4-}$是孤立的,彼此借 Zr^{4+} 连接起来,Zr^{4+} 的配位数为 8。

[形态] 对称型 L^44L^25PC,晶形呈四方双锥状、柱状、板状,主要单形有四方柱、四方双锥、复四方双锥,锆石的晶形可随其成因而变化,在碱岩或偏碱性的岩浆岩中,锥面发育,而柱面不发育,呈短柱状或四方双锥状,在中酸性岩浆岩中,锥面、柱面均较发育,呈双锥柱状。而在酸性岩浆岩中则柱面发育,在基性岩、中性岩或偏基性的花岗岩中,除见柱面外,还出现复四方双锥。此外,锆石的晶形还与结晶时的温度、压力及介质含有杂质有关。

[物理性质] 颜色绚丽多样,无色、红棕色、黄色、灰色、绿色,金刚光泽,有时呈油脂光泽,硬度 7~8,性脆,断口油脂光泽,参差不齐或贝壳状,比密度 4.6~4.7,非晶质化的锆石硬度降低至 6,比密度为 4,透明至半透明,解理不完全,熔点高,在 3000℃以上,水锆石和曲晶石具有放射性。

[鉴定特征] 锆石以其呈四方柱及四方双锥的聚形,大硬度、金刚光泽为其特征,与金红石的区别是硬度较大,金红石有[110]完全解理及 Ti 之反应;与锡石区别是锆石比密度较小,锡石有 Sn 之反应;与独居石区别是形状不同,独居石呈板状,硬度也略低。

[用途]　锆石是提炼锆的主要原料，锆属难熔物质，在国防尖端工业中利用这一性质可做保护人造卫星的外罩。锆又具抗腐蚀、机械性能好的特点，在原子能、无线电、冶金、造船等工业上均有重要应用。此外，从锆石中常可综合利用铪、稀土、放射性元素。

在陶瓷工业中，锆英石主要用在釉料中，是乳浊熔块常用和必用的原料，作为乳浊剂。是目前陶瓷工业最常用、乳浊效果最好、最稳定的乳浊剂，此外，还可作为坯釉的增白剂，实验证明，引入7%的锆英石，可提高白度8%。

实例一：烧成温度1080℃的锆乳浊釉配方(%)：

釉料配方：熔块70、长石27、苏州土3。

熔块配方：石英28、长石24、硼砂16、锆英石10、硼酸2、氧化锌10、方解石9、滑石3。

实例二：烧成温度1100～1160℃的建陶用锆釉配方(%)：

熔块25、长石27(钠长石为主)、石英13、高岭土10、氧化锌7、硅灰石6、锆英石12(粒径2～5μm)。

实例三：烧成温度1100～1120℃的面砖釉熔块配方(%)：

硼砂24、长石15、锆英石粉10、苏州土5、氧化铝5、铅丹6、方解石5、氟硅酸钠6。

6.5.4　蓝晶石族

本族矿物包括蓝晶石、红柱石、硅线石，他们的化学成分同为Al_2SiO_5，但晶体结构不同，它们是3个同质多象变体，它们的共同点是Si和O形成$[SiO_4]$四面体，有半数的Al与O结合成$[AlO_6]$八面体，配位数为6，还有半数的Al表现不同，是这三种矿物结构差异所在，这表现在蓝晶石中这半数的Al仍作六次配位，形成$[AlO_6]$八面体。在红柱石里，Al则出现配位数为5的罕见情况，而在硅线石中，这一半的Al作四次配位，形成$[AlO_4]$四面体，蓝晶石、红柱石为岛状硅酸盐，硅线石属于链状硅酸盐，但由于这三种矿物成分相同，且在成因产状上又有类同之处，故并在一起叙述。

这三种矿物均属于典型的变质矿物，系由Al_2O_3较高的泥质岩石变质而成，但它们却分别出现在不同的变质环境下。红柱石形成在低温低压条件，蓝晶石则在高压条件下形成，而硅线石则在高温及很大压力下才出现。所以，蓝晶石见于区域变质的结晶片岩中，红柱石则多见于接触变质作用所形成的角岩中，硅线石在结晶片岩及角岩中均可出现。

本族矿物加热到1300℃以上时都将转变成为莫来石$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$和硅铝质玻璃。

红柱石　$Al_2[SiO_4]O$，又称菊花石

[化学组成]　Al_2O_3 63.1%，SiO_2 36.9%，常含Fe^{3+}、Mn^{2+}，Fe_2O_3可达9.6%，MnO可达7.7%。

有一种含碳包裹体的红柱石，称做空晶石，碳质物(和粘土物质)在其中作定向排列，呈黑十字形(横切面)，而纵断面上呈与晶体延长方向一致的黑色条纹。

[晶体参数与结构]　斜方晶系，$a_0=7.78$Å，$b_0=7.92$Å，$c_0=5.57$Å。

[形态]　对称型$3L^2 3PC$，晶形呈柱状，横断面近正四边形，双晶少见。主要单形为斜方柱、平行双面，集合体呈粒状、柱状、放射状，呈放射状者形似菊花，俗称菊花石。

[物理性质]　颜色多彩，新鲜面常呈玫瑰红色，通常为灰白、黄色、褐色、红色、深绿色，玻璃光泽，[110]解理中等，硬度6.5～7.5，比密度3.13～3.16，易风化，风化后硬度降低，断口不平坦，不溶于酸。

［鉴定特征］ 以晶形柱状，横切面近于正四方形，柱面[110]解理中等，以硝酸钴试之呈Al的反应，产于中、低级热变质带中的为其特征。

［用途］ ①具强耐火性，是高级耐火材料。②作为高铝瓷的原料。③色泽鲜艳、透明的可作宝石及装饰品。

蓝晶石(二硬石)$Al_2[SiO_4]O$

［化学组成］ 同红柱石，但常含少量Cr^{3+}、Fe^{3+}、Ti^{4+}等类质同象混入物，Cr≤12.8%，Fe_2O_3不超过1%～2%。

［晶体参数与结构］ 三斜晶系，$a_0=7.10$Å、$b_0=7.74$Å、$c_0=5.57$Å；$\alpha=90°06'$、$\beta=101°02'$、$\gamma=105°45'$。

［形态］ 对称型C，晶体沿Z轴呈扁平柱状、长板状、刀片状，双晶常见，双晶面平行[100]，多系聚片双晶，集合体有时排列呈放射状。

［物理性质］ 颜色为浅蓝色或蓝灰色(晶体中心较深，边缘较浅)，亦有灰色、绿色、黄、粉红、黑色等，玻璃光泽，解理面上有珍珠光泽，平行{100}解理完全，{010}中等，{001}有裂开，硬度随方向不同而异，故有二硬石之称。在(100)面上，平行Z轴方向硬度为4.5，垂直方向为6，而在(010)面上和(110)面上垂直Z轴方向则为7，比密度3.53～3.65，性脆。

［鉴定特征］ 根据其浅蓝色、扁平柱状晶形、完好的解理性、明显的硬度异向性和主要产于结晶片岩中等特征易于认出，以硝酸钴试之呈Al反应(深蓝色)。

［用途］ ①作高级耐火材料。②作为陶瓷工业高铝原料。

硅线石(夕线石)$Al[AlSiO_4]O$

［化学组成］ 同红柱石，成分比较稳定，常有少量的类质同象混入物Fe替代Al，有时有微量的Ti、Ca、Mg、K、Na等混入物。

［晶体参数与结构］ 斜方晶系，$a_0=7.43$Å、$b_0=7.58$Å、$c_0=5.74$Å。

［形态］ 对称型$3L^23PC$，单晶体很难见到，一般呈针状集合体或纤维状集合体，有时被包含于其他矿物中呈毛发状或放射状，硅线石之所以呈如此形态与其链状结构有密切关系。

［物理性质］ 白色、灰色或浅绿、浅褐色，玻璃光泽，硬度7，比密度3.23～3.27，平行(010)面解理完全。

［鉴定特征］ 针状、纤维状、放射状形态，具完全解理，在接触变质带和变质岩中产出。

［用途］ ①可作为陶瓷工业的高铝原料。②作耐火材料，如陶瓷工业的匣钵、梭式窑的棚板等。

6.5.5 黄玉族

黄玉(黄晶)$Al_2[SiO_4](F,OH)_2$

［化学组成］ Al_2O_3 56.54%、SiO_2 33.22%、F 17.61%。自然界产出的黄玉其成分近于理论值，仅部分F^-可被$(OH)^-$所置换而已，置换的最高量占氟含量的30%左右，形成的温度愈高，含氟量愈高。

［晶体参数与结构］ 斜方晶系，$a_0=4.65$Å、$b_0=8.8$Å、$c_0=8.40$Å。

［形态］ 对称型$3L^23PC$，单晶体常呈柱状、短柱状，常见单形为斜方柱、斜方双锥、平行双面等。柱面常有纵纹。集合体呈柱状、粒状和致密块状。

［物理性质］ 无色透明，或带浅黄、浅绿、浅蓝等色，久受日光曝晒色调可减退，玻璃光泽，

硬度 8，性脆，[001]解理完全，非解理方向呈贝壳状断口，比密度 3.52～3.57，受 H_2SO_4 作用时表面会被腐蚀。

[鉴定特征] 柱状晶形，柱面具纵纹，[001]解理完全，高硬度以此可与类似的石英区分。

[用途] 可作研磨材料、精细仪表的轴承。透明色美者可作宝石。

6.5.6 榍石族

本族矿物以榍石为常见。

榍石 $CaTi[SiO_4]O$

[化学组成] CaO 28.5%、TiO_2 40.78%、SiO_2 30.72%，经常含类质同象混入物，其间被置换关系如下：Ca 可被 Na、TR、Mn、Sr、Ba 置换，Ti 可被 Al、Fe^{3+}、Nb、Ta、Th、Sn、Cr 置换，O 可被 OH、F、Cl 置换。富含 TR（主要是 Y、Ce），$(Y,Ce)_2O_3$ 可达 12%～28%称钇榍石，富含 Mn 的称红榍石（MnO 可达 3%）。

[晶体参数与结构] 单斜晶系，$a_0=6.56$Å、$b_0=8.72$Å、$c_0=7.44$Å，$\beta=119°43'$。

[形态] 对称型 L^2PC。多以单晶体出现，常呈横切面为菱形的扁平信封状的柱体，聚形极为多样，最常出现的单形为平行双面，斜方柱等，常形成接触或穿插双晶，晶面上常具不规则裂纹。

[物理性质] 黄色、褐色、绿色、灰色、褐黑色。含有较多量的 MnO 时，可呈红色或玫瑰色，条痕无色或白色，透明至半透明，金刚光泽，断口为松脂光泽，硬度 5～6，比密度 3.29～3.60，{110}解理清楚，具贝壳状断口，在 H_2SO_4 中溶解。

[鉴定特征] 信封状、扁平柱状晶体，菱形断面，金刚光泽，硬度大为主要特征。

[用途] 大量积聚时可作为提炼钛的矿物原料，钇榍石可作为提炼稀土钇的原料，陶瓷工业中可作为潜在的乳浊剂和制造色料的原料。

6.5.7 方柱石族：方柱石

方柱石族矿物是由两个端员组分，即铝方柱石 $Ca_2Al[AlSiO_7]$和镁方柱石 $Ca_2Mg[Si_2O_7]$所组成的类质同象系列，方柱石是其中间成员。

方柱石 $Ca_2(Mg,Al)[(Si,Al)_2O_7]$

[化学组成] 方柱石中经常含有一定数量的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+}，也可含有少量的 K 及 Mn 等元素。人工合成方柱石还有纯粹的铁方柱石 $Ca_2Fe[Si_2O_7]$、锌方柱石 $Ca_2Zn[Si_2O_7]$和钠方柱石 $NaCaAl[Si_2O_7]$等。

[晶体参数和结构] 四方晶系，$a_0=7.73$Å、$c_0=5.10$Å。

[形态] 晶体为四方短柱状或板状，对称型 L^42L^22P，有时呈不规则粒状。

[鉴定特征] 黄色短柱状和板状为其特征。精确鉴定要在显微镜下观察才能确定。

[用途] 可作为陶瓷原料使用。

6.6 环状结构硅酸盐亚类

在前面硅酸盐晶体构造中曾指出：环状结构硅酸盐可分三方环、四方环、六方环和双层六方环等几种，属于三方环的矿物很少，且不常见，四方环者有斧石，属于六方环的常见矿物有绿

柱石、堇青石和电气石，本教材仅介绍属于六方环的矿物。

6.6.1 绿柱石族

绿柱石 $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$

[化学组成] BeO 14.1%、Al_2O_3 19%、SiO_2 66.9%。经常含有碱金属，自 Li 至 Cs 均可存在，含量高者可达 5%～7%。往往含有相当数量的水。同时，少量的 Fe^{3+} 可以置换 Al^{3+}，微量的 Mg^{2+} 也可置换 Be^{2+}，富含 Cs 和 Li 的变体叫铯绿柱石，含微量 Cr，呈翠绿色透明的变种称祖母绿，透明蓝色的变种称海蓝宝石。

[晶体参数和结构] 六方晶系，a_0=9.188Å、c_0=9.189Å。

[形态] 对称型 $L^6 6L^2 7PC$，单晶体为长柱状，在碱性环境或温度较低时，则呈短柱状、板状，单形为六方柱、平行双面，晶面常具纵纹，集合体为柱状、晶族状，有时为粒状或致密块状。

[物理性质] 纯的绿柱石无色透明，常见的颜色为不同色调的绿色，但也有呈浅黄色、浅蓝色、玫瑰色等，这与绿柱石内含有不同的杂质有关。玻璃光泽，硬度 7.5～8，{0001}及{10$\bar{1}$0}解理不完全，比密度 2.6～2.9，断口参差状或贝壳状。

[鉴定特征] 以六方长柱状晶形，硬度大，绿色，不完全解理为其特征。与磷灰石的区别是绿柱石硬度大，晶面上有纵纹，无磷的化学反应。与刚玉的区别是绿柱石比密度小，白色细粒状的绿柱石有时易与石英、长石混淆。此时，可将其粉末加入 KOH 熔融之，然后溶解于水，加入少许醌茜素($C_{14}H_{12}O_2$)，若现蓝色，则为 Be 的反应。

[用途] 是提炼铍的最主要矿物原料，广泛用于航空导弹、宇航及原子能工业上，色泽美丽者可作宝石，还可作为陶瓷工业助熔性原料。

6.6.2 堇青石族

堇青石$(Mg,Fe)_2Al_3[AlSi_5O_{18}]$

[化学组成] MgO 13%、Al_2O_3 34.96%、SiO_2 51.36%，成分中 Mg 和 Fe 可作完全类质同象代替，因而可分为镁堇青石和铁堇青石两个亚种，但自然界产出大多数的是富镁的，而富铁的较为少见，这是由于镁能优先进入堇青石的晶体结构中，堇青石中也含有少量的 Ti、Mn，在结构的通道中，可有 H_2O、Na、K 等存在。

[晶体参数和结构] 斜方晶系，a_0 = 17.07～17.13Å，b_0 = 9.73～9.80Å，c_0 = 9.29～9.35Å。

[形态] 对称型 $3L^2 3PC$，晶体不常出现，有时可见呈假六方柱状，或呈不规则粒状，常见单形有斜方柱、斜方双锥、平行双面。双晶普遍，常形成简单的接触双晶或三连晶、聚片双晶，集合体呈致密块状和粒状。

[物理性质] 无色至灰黑色，常见微带蓝色或紫蓝色，经风化后，颜色变浅，呈黄白色、褐色。玻璃光泽，硬度 7，{010}解理中等，{001}、{100}解理不完全，贝壳状断口，比密度 2.53～2.79，性脆。

[鉴定特征] 以颜色、玻璃光泽、硬度大、贝壳状断口、成因为其特征。与石英区别是堇青石一般显浅蓝色、玻璃光泽，但可靠鉴定借助于光性测定。

[用途] 因堇青石具很小的热胀系数，可广泛应用于低膨胀耐热陶瓷制品中，此外可作为陶瓷工业的匣钵、棚板耐火砖的原料。

6.6.3 电气石族

电气石$(Na,Ca)(Mg,Fe,Li,Al)_3Al_6[Si_6O_{18}](BO_3)_3(OH,F)_4$

[化学组成] 电气石是一种成分比较复杂的硅酸盐矿物，以含硼为其特征。它的化学组成基本上由以下3个端员组分构成：

锂电气石 $Na(Li,Al)_3Al_6[Si_6O_{18}](BO_3)_3(OH,F)_4$

黑电气石 $NaFe_3Al_6[Si_6O_{18}](BO_3)_3(OH,F)_4$

镁电气石 $NaMg_3Al_6[Si_6O_{18}](BO_3)_3(OH)_4$

黑电气石与镁电气石之间，以及黑电气石与锂电气石之间均为完全类质同象系列，但锂电气石和镁电气石之间则为不完全类质同象。此外电气石中尚可含有少量的Cr^{3+}、Fe^{3+}、K^+，K^+取代Na^+，而Cr^{3+}及Fe^{3+}则取代其中的Mg^{2+}、Fe^{2+}和Al^{3+}。附加阴离子一般以$(OH)^-$为主，但可有F^-，尤其是锂电气石中含F^-较高。自然界黑电气石和锂电气石系列的中间成员较为少见。

[晶体参数及结构] 三方晶系，$a_0=15.84\sim16.03$Å、$c_0=7.09\sim7.22$Å。

[形态] 对称型L^33P，单晶体呈短柱状、长柱状、针状，常见单形为三方柱、六方柱、三方单锥等。晶体两端晶面不同，柱面上常出现纵纹，横断面呈球面三角形，集合体呈放射状、柱状、针状或粒状。

[物理性质] 电气石颜色多样，以黑色常见，也有呈褐、绿、蓝、红、玫瑰等色，一般来说镁电气石呈褐色，锂电气石为玫瑰色至红色或蓝绿色，黑电气石则为黑色。无色的电气石少见，玻璃光泽，硬度7～7.5无解理，参差状断口，比密度3.03～3.25，具热电性和压电性。

[鉴定特征] 以柱状晶形、柱面具纵纹、横断面呈球面三角形、无解理、高硬度为特征。

[用途] 锂电气石、镁电气石可作压电陶瓷、热释电陶瓷的原料，色泽美丽者可作宝石，黑电气石在陶瓷工业原料中是有害物质。

6.7 链状结构硅酸盐亚类

链状结构硅酸盐有单链、双链之别。辉石族是单链的典型代表，此外尚有硅灰石、蔷薇辉石等，角闪石族是双链的典型代表(硅线石按结构特征亦属双链之列，但根据化学组成、产出条件等因素考虑，已放在岛状结构硅酸盐的蓝晶石族中一并叙述)。由于具链状结构，因而决定了矿物形态必然是柱状、针状、纤维状等，柱体方向与链的延长方向一致。这两族矿物皆属低级晶族，其中大多数为单斜晶系，少数为斜方晶系或三斜晶系，解理发生在链与链之间，也亦沿链的延长方向发育。

6.7.1 辉石族

辉石族矿物是最主要的造岩矿物之一，广泛地存在于各种成因的岩石中，它包括斜方辉石、单斜辉石两个亚族，其主要化学组成可以用通式$XY[Si_2O_6]$表示。

$Y=Mg、Fe^{2+}、Mn、Al、Fe^{3+}$

$X=Ca、Mg、Fe^{2+}、Mn、Na、Li$

阳离子之间可以彼此类质同象置换，络阴离子中的Si，在自然界中少量可为Al代替，在

合成矿物中 Al 代替 Si 可达 1/2 左右。

斜方辉石亚族 X 主要为 Mg、Fe 等小半径的阳离子，最重要的是顽火辉石 $Mg_2[Si_2O_6]$与铁辉石 $Fe_2[Si_2O_6]$系列，单斜辉石亚族 X 中以出现较大半径的阳离子 Ca、Na 为特点，按其阳离子种类可划分为若干系列，其中最主要的是透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$—钙铁辉石 $CaFe[Si_2O_6]$系列。

辉石族矿物晶体结构特点是络阴离子呈单链状$[Si_2O_6]^{4-}$，单链沿一个方向延伸，单链之间靠金属阳离子连接。

辉石族主要矿物种类有：

斜方辉石亚族：

顽火辉石	$Mg_2[Si_2O_6]$
古铜辉石	$(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$
紫苏辉石	$(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$

单斜辉石亚族：

透辉石	$CaMg[Si_2O_6]$
钙铁辉石	$CaFe[Si_2O_6]$
普通辉石	$Ca(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Ti,Al)[(Si,Al)_2O_6]$
霓石	$NaFe[Si_2O_6]$
霓辉石	$(Na,Ca)(Fe^{3+},Fe^{2+},Mg,Al)[Si_2O_6]$
锂辉石	$LiAl[Si_2O_6]$
硬玉	$NaAl[Si_2O_6]$

1. 斜方辉石亚族

本亚族矿物是由顽火辉石 $Mg_2[Si_2O_6]$和斜方铁辉石 $Fe_2[Si_2O_6]$两个端员组分构成的完全类质同象系列，其中间成员为古铜辉石和紫苏辉石。

顽火辉石 $Mg_2[Si_2O_6]$

［化学组成］ MgO 40%、SiO_2 60%。纯顽火辉石在自然界中少见，一般都含低于 5%的 FeO，有时还含 Al_2O_3(最高达 7.39%)、Fe_2O_3(最高达 4.66%)、CaO(最高达 3.07%)，还有 TiO_2 和 MnO，如果 FeO 含量在 5%～14%时则称古铜辉石。

［晶体参数和结构］ 斜方晶系，$a_0=18.228$Å，$b_0=8.805$Å，$c_0=5.185$Å。

［形态］ 对称型 $3L^23PC$，晶体为平行于 C 轴延长的短柱状晶体，常见单形为平行双面、斜方柱。

［物理性质］ 白色至灰色，含铁则呈浅褐色至黄褐色，玻璃光泽，硬度 5～6，比密度 3.2～3.3，有平行{110}两组中等解理，解理夹角 87°和 93°。

［鉴定特征］ 以颜色较浅和紫苏辉石区别，但准确地与其他斜方辉石和单斜辉石相区分，则需靠偏光显微镜下鉴定。

［用途］ 陶瓷工业中可作为建筑陶瓷的坯用原料，含铁低的还可作为釉用原料引入。

紫苏辉石$(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$

［化学组成］ 与顽火辉石的区别是含 FeO 在 14%以上，次要成分与顽火辉石相似，几种元素的最高含量有所加大。

［晶体参数和结构］ 斜方晶系，$a_0=18.235$～18.310Å，$b_0=8.841$～8.931Å，$c_0=5.187$

~5.189Å。

［形态］ 对称型 $3L^23PC$，单晶体为短柱状，集合体为柱状。

［物理性质］ 很多物理性质与顽火辉石相似，不同的是颜色较深，一般为绿色至绿黑色，比密度较大为 3.3~3.5，这些差异系其成分中含 FeO 量高的缘故。

［鉴定特征］ 同顽火辉石。

［用途］ 可作为中低档红坯建筑陶瓷的坯用原料引人。

2. 单斜辉石亚族

由于晶体结构中存在大小不同的阳离子而使对称型程度降低为单斜晶系。

透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$

透辉石为 $CaMg[Si_2O_6]$—$CaFe[Si_2O_6]$类质同象系列的端员矿物，而系列的另一端称为钙铁辉石。

［化学组成］ CaO 25.9%、MgO 18.5%、SiO_2 55.6%、Al_2O_3 含量一般为 1%~3%（可高达 8%），Al^{3+} 可以代替 Mg、Fe，也可以代替 Si，如果 Al 代替四面体中的 Si 超过 7%，称之为铝透辉石，此外还可含有少量的 Cr、Ni、Ti、Mn、Na 等。

［晶体参数与结构］ 单斜晶系，$a_0=9.73$Å、$b_0=8.91$Å、$c_0=5.25$Å，$\beta=105°50'$。

［形态］ 对称型 L^2PC，针状、短柱状晶体，横切面近于正方形，主要单形为平行双面、斜方柱，集合体为块状、粒状、放射状，多以放射状或致密块状集合体产出。

［物理性质］ 白色、灰绿、绿至褐绿、黑色。条痕无色至深绿，解理{110}两组完全，解理夹角 87°与 93°，有时具{100}和{010}裂开，玻璃光泽，硬度 5.5~6，比密度 3.22~3.56。

［鉴定特征］ 以短柱状晶形，横断面形状，浅绿及浅灰的颜色区别于普通辉石，产于夕卡岩中的透辉石，则以其放射状集合体及共生矿物为主要鉴定特征。

［用途］ 透辉石是陶瓷工业优良的助熔剂和一次低温快烧的建陶坯用原料，不仅能降低产品烧成温度，并且可提高产品的白度、光泽度、机械强度，透辉石的主要工艺特性如下：

①透辉石加热时变形温度（收缩温度）为 1170℃，软化温度 1280℃，熔融温度为 1290℃。

②透辉石在坯体配方中，热反应性、干燥收缩、烧成收缩小，平均收缩在 0.5%以下。

③透辉石热膨胀系数小，$\alpha_{热}(20\sim800℃)=6.5\times10^{-6}/℃$，且与温度成线性关系，有利于快速烧成。

④透辉石能与其他原料组成 Ca—Mg—Al—Si 四元配方，降低烧成温度，提高热稳定性。

⑤透辉石吸湿膨胀小，利于快速干燥，快速烧成。

实例一：1080~1100℃一次低温快烧釉面砖坯体配方（%）：

透辉石 35、硅灰石 15、长石 5、滑石 5、粘土 20、白泥 20。

实例二：典型陶质釉面砖坯体配方（%）：

透辉石 40、粘土 40、石英 15、长石 5。

实例三：烧成温度 1250~1280℃透明釉配方（%）：

长石 30、透辉石 15、滑石 5、石英 20、方解石 14、碳酸钡 4、氧化锌 2、粘土 10。

普通辉石 $Ca(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al)[(Si,Al)_2O_6]$

［化学组成］ 普通辉石的化学成分比较复杂，与其他辉石相比以富含 Al_2O_3（4%~9%）和 Fe_2O_3 为特征，有时还含有 TiO_2 和 Na_2O，含 TiO_2 达 3%~5%（有的可达 8%以上）可称钛辉石。次要成分还有少量 Cr、Ni、Mn 及微量元素 V、Co、Cu、Sc、Zr、Ca、Y、La、Li、Br、Ba 等。

［晶体参数及结构］ 单斜晶系 $a_0=9.8Å$、$b_0=9.0Å$、$c_0=5.25Å$，$\beta=105°$。

［形态］ 对称型 L^2PC，晶体为短柱状，横切面近似八边形，常见单形有平行双面、斜方柱，集合体为致密块状、柱状。

［物理性质］ 绿黑色或褐黑色，少数呈褐色、暗绿色，玻璃光泽，硬度5～6，比密度3.2～3.6，{110}两组解理中等，解理夹角87°与93°，常有{100}裂开，显著者称为异剥石。

［鉴定特征］ 以短柱状晶形和绿黑的颜色，横断面近似正八边形和解理夹角为其特征，与同族其他矿物的区别，需在偏光显微镜下鉴定。

［用途］ 陶瓷工业中，因含铁较多，在坯、釉中是有害物质，但可作黑色颜料原料引入。

锂辉石 $LiAl[Si_2O_6]$

［化学组成］ 锂辉石化学成分较稳定，接近于理想情况，Si很少被Al所置换。Li_2O 8.1%、Al_2O_3 27.4%、SiO_2 64.5%，常含有Na、Fe、Cr、Mn等混入物，有时还有Cs和稀土元素。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0=9.463Å$、$b_0=8.392Å$、$c_0=5.218Å$，$\beta=110°11'$，锂辉石受热至900℃以上时可以转变成四方晶系的β-锂辉石，因此常温常压下的锂辉石又名α-锂辉石。

［形态］ 对称型 L^2，晶体呈柱状，单形有平行双面、单面、轴双面，柱面有纵纹，集合体为柱状、致密块状。

［物理性质］ 无色、灰白色。因杂质可呈黄、绿、紫等色，翠绿色的称为翠绿锂辉石（含Cr），及紫色的锂辉石（含Mn），玻璃光泽，硬度6.5～7，比密度3.03～3.22，解理面具珍珠光泽，{110}解理完全或中等，解理交角87°与93°，具发光性，在X射线照射时呈橙色，在阴极射线照射时显橙色和柠檬黄色。此外，锂辉石的热膨胀系数特别小，为 6.5×10^{-6}/℃，并且随温度升高呈线性变化，在900℃左右时甚至出现负膨胀。

［鉴定特征］ 以色浅、柱状晶形、柱面有纵纹、产于伟晶岩中为其特征，吹管火焰烧之膨胀并染火焰呈浅红色（锂的反应），与 CaF_2+KHSO_4 合熔后，染火焰呈鲜红色（锂的反应）。

［用途］ 为提炼锂的原料之一，锂广泛用于原子工业、医药、玻璃、焰火、照相等方面，透明而色泽美丽者可作宝石。

在陶瓷工业中，Li_2O 是碱金属氧化物中最强烈的熔剂，它的作用为：

①含锂矿物是陶瓷工业优良的熔剂原料，由于 Li^+ 的活动性比 Na^+、K^+ 强，分子量比 Na^+、K^+ 低，因此其熔剂能力比钠长石、钾长石强得多。

②Li_2O 引入到釉中，能明显提高产品的热稳定性，原因是含锂矿物，尤其是锂辉石在釉中为低的甚至出现负的热膨胀。

③含锂矿物有优良的热稳定性能、极小的热膨胀系数，可作为主要原料引入到低膨胀耐热陶瓷的坯釉配方中。

④含锂矿物用于釉料中，能降低釉的表面张力，增加釉的高温流动性，有利于坯体中的气体、挥发分等向釉中扩散，利于釉层挥发分、气泡排出，因此可减少釉面针孔，并提高产品的光泽度。

⑤含锂矿物在高温时熔解石英的能力比钾、钠长石强得多，使釉中残留石英颗粒更加细小，并能促使莫来石晶体的形成，促使坯釉中间层形成，使坯釉结合更加牢固。

⑥含锂矿物始熔点较高，利于坯釉中炭素烧尽，因此，可减少产品桔釉、吸烟等缺陷。

实例一：烧成温度1320℃左右的日用瓷釉料配方(%)：

星子长石44、福建泰宁土14、石英18、烧滑石12、锂辉石3、釉果1、废瓷片8。

实例二：1050～1100℃使用的釉面砖熔块配方(%)：

硼砂5～10、硼酸3～5、长石25～35、石英25～30、锆英石10、氧化锌5、方解石8～15、铅丹1～5、含锂矿物3、滑石5～8。

6.7.2 角闪石族

是与辉石一样重要的造岩矿物，广泛分布在各种成因类型的岩石中，它包括斜方角闪石和单斜角闪石两个亚族，属双链结构硅酸盐，其主要化学组成可以用通式 $X_{2-3}Y_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$ 表示，式中：

$X=Ca、Na、K、Mn、Mg、Fe^{2+}$；

$Y=Mg、Fe^{2+}、Fe^{3+}、Al、Ti、Cr、Li$ 等。

角闪石族矿物阳离子之间的类质同象置换现象极其复杂多样，并且络阴离子中的 Si^{4+} 可以为 Al^{3+} 所代替，少量的 Fe^{3+}、Ti^{4+} 也可以代替 Si^{4+}。Al 代替 Si 一般不超过 1：3。附加阴离子(OH)可以为 F^-、Cl^- 所代替。

角闪石族矿物的晶体结构特点是络阴离子呈双链状，$[Si_4O_{11}]^{6-}$ 双链向一个方向延伸，双链和双链之间靠金属阳离子连接，由于双链内部存在着较大空隙，所以 $(OH)^-$ 可存在于构造空隙中，阳离子除和氧相连外，也与 $(OH)^-$ 相连。

本族矿物由于类质同象置换现象很普遍，所以形成很多矿物种，根据X类阳离子的种类大致可以分为3个系列：

镁—铁系列　X类阳离子主要是 Mg^{2+}、Fe^{2+}

钙碱土性系列　X类阳离子主要是 Ca^{2+}

钠碱性系列　X类阳离子主要是 Na^+

这三个系列之间一般不存在明显的类质同象。各系列按Y类阳离子的种类不同分成不同的矿物种。

斜方角闪石亚族主要是指镁—铁系列中的斜方角闪石，成分中 Mg、Fe 可以有限制地代替。由于 Fe^{2+} 半径 0.82Å，比 Mg^{2+} 的半径 0.78Å 稍大，如 Fe^{2+} 对 Mg^{2+} 的替换大于43%时将引起结构的变化，出现镁—铁系列的单斜角闪石—镁铁闪石。

单斜角闪石亚族包括 Mg—Fe 系列中的单斜角闪石和其他两个系列的所有角闪石，现将角闪石族主要矿物种列于下：

斜方角闪石亚族：

直闪石　$(Mg,Fe^{2+})_7[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

铝直闪石　$(Mg,Fe^{2+})_5Al_2[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

锂蓝闪石　$Li_2(Mg,Fe^{2+})_3(Al,Fe^{3+})_2[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

单斜角闪石亚族：

镁铁闪石　$(Mg,Fe^{2+})_7[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

铁闪石　$Fe_4^{2+}(Fe^{2+},Mg)_3[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

透闪石　$Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

阳起石　$Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5[Si_2O_8]_2(OH)_2$

普通角闪石 $Ca_2Na(Mg,Fe)_4(Al,Fe^{3+})[(Si,Al)_4O_{11}]_2(OH)_2$

蓝闪石 $Na_2(Mg,Fe)_3Al_2[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

钠闪石 $Na_2(Fe^{2+},Mg^{2+})_3Fe_2^{3+}[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

钠铁闪石 $Na_3(Fe,Mg)_4(Fe,Al)[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

镁钠闪石 $Na_3Mg_4Al[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

本教材只介绍单斜角闪石亚族的透闪石、阳起石和普通闪石。

透闪石 $Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$

[化学组成] CaO 13.8%、MgO 24.6%、SiO_2 58.8%、H_2O 2.8%，FeO 的含量有时达3%，成分中还可有少量的 Na、K、Mn 代替 Ca，F、Cl 代替(OH)。

[晶体参数和结构] 单斜晶系，$a_0=9.84$Å、$b_0=18.05$Å、$c_0=5.28$Å，$\beta=104°22'$。

[形态] 对称型 L^2PC 晶体呈长柱状、针状，有时呈毛发状，平行 Z 轴延伸，常见单形为斜方柱，平行双面，集合体呈放射状，纤维状。有时可以见到(100)简单接触双晶或聚片双晶，而(001)聚片双晶罕见。

[物理性质] 白色、浅灰白色，玻璃光泽，纤维状集合体者呈丝绢光泽，硬度 5～6，平行{110}两组解理中等，交角为 124°和 56°，比密度 2.9～3.0，不溶于酸。

[鉴定特征] 以柱状、针状晶形、浅色、解理为其特征，与阳起石区别是透闪石的颜色浅，与硅灰石区别是硅灰石遇浓 HCl 能分解。

[用途] 透闪石是陶瓷工业优良的熔剂原料，也是一次低温快烧建陶的优质坯用原料，不仅可降低产品的烧成温度，而且可增宽产品的烧成范围，提高产品的光泽度和机械强度、热稳定性，其主要工艺特性如下：

①透闪石的热膨胀系数较小，且与温度成线性关系，使产品烧成稳定性好。

②透闪石的干燥收缩小，烧成收缩小，体积变化小。

③透闪石的吸湿膨胀小，利于快速干燥，快速烧成。

④透闪石为针状或长柱状晶体，其构成的网络通道利于水分、挥发分快速排出，因此可实现快速烧成。

⑤透闪石能与其他原料组成 Ca—Mg—Si—Al 四元配方，降低产品烧成温度，提高产品的热稳定性。

实例：1100℃一次低温快速烧成釉面砖坯体配方(%)：

透闪石 34、叶蜡石 17、萍乡黑泥 22、萍乡红粘土 16、石英 6.5、长石 4.5。

阳起石 $Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5[Si_2O_{11}]_2(OH)_2$

[化学组成] 与透闪石之区别是铁的含量较高，可达 6%～13%。

[晶体结构和形态] 与透闪石基本相同，仅因含 Fe 量不同，致使阳起石晶胞参数稍大，$a_0=9.89$Å、$b_0=18.14$Å、$c_0=5.31$Å，$\beta=105°48'$。阳起石形态上以放射状集合体为特征。

[物理性质] 与透闪石有很多相似之处，因该矿物 FeO 含量高，故颜色为浅绿色至深绿色，比密度也较大，一般为 3.1～3.3。

透闪石和阳起石根据形态和结构特点，可分出两个异种：

软玉：呈隐晶质致密块状的阳起石或透闪石称软玉。性坚韧，颜色为绿色，玻璃光泽或蜡状光泽，具刺状断口，是装饰和雕刻材料。

角闪石石棉：是透闪石石棉和阳起石石棉的统称，呈纤维状集合体，且易劈裂为细丝状，具

挠性而坚实，具耐火(热的不良导体)和耐酸性。颜色灰白或带绿色，丝绢光泽。可适用工业上，但纤维太短。

［鉴定特征］ 与透闪石同。

［用途］ 可作为中低档红坯建陶坯用原料，因含 Fe 较多，不能用于日用瓷、卫生瓷、高档建陶的坯用原料。

普通角闪石 $Ca_2Na(Mg,Fe)_4(Al,Fe^{3+})[(Si_7Al)_4O_{11}]_2(OH)_2$

［化学组成］ 普通角闪石的成分远比其他角闪石矿物复杂得多，类质同象代替现象也较普遍。其中部分 Si^{4+} 可被 Al^{3+} 代替，相应的部分镁可被 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 代替，并有钠离子加入，此外常含 TiO_2 0.1%～1.25%。

［晶体参数与结构］ 单斜晶系，$a_0=9.79$Å、$b_0=17.90$Å、$c_0=5.28$Å，$\beta=105°31'$。

［形态］ 对称型 L^2PC，晶体多呈长柱状，横断面为假六边形(近似菱形)，常见单形有斜方柱、平行双面，有时形成简单双晶或聚片双晶，集合体呈长柱状、纤维状等。

［物理性质］ 深绿色到黑绿色，条痕无色或白色，{110}解理完全，二组解理夹角为 124°和 56°，有时具{100}和{001}裂开，硬度 5～6，比密度 3.1～3.3，玻璃光泽。

［鉴定特征］ 以长柱状晶形、横断面形状、暗绿的颜色、解理夹角等为主要特征。

［用途］ 陶瓷工业中因含 Fe 多，坯釉配方中属有害物质，但可作为黑色颜料原料引入。

辉石族和角闪石族矿物对比：

辉石族和角闪石族是链状硅酸盐中最重要的矿物族，也是重要的造岩矿物，在自然界分布很广泛，因此，加以对比掌握它们的共同点及不同点是很重要的。由于它们成分、构造的相似性，决定他们之间有许多共同的性质。

①主要化学成分相近，辉石族矿物络阴离子根为$[Si_2O_6]^{4-}$，角闪石族矿物的络阴离子根为$[Si_4O_{11}]^{6-}$，这二族矿物中阳离子主要均是 Ca、Mg、Na、Fe^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}。

②形态大多数为单斜晶系，其次为斜方晶系，一般均呈平行硅氧四面体链的方向的柱状。

③除个别外，主要因含 Fe 而颜色多为深浅不同的绿色，有时具棕色或褐色，玻璃光泽，具有平行{110}两组解理，比密度中等，一般在 3 左右，硬度一般为 5～6，少数硬度稍大。

除上述相似性以外，它们又各自具有特殊性。

①角闪石一般呈长柱状、针状、纤维状，而辉石一般呈短柱状、柱状。

②它们两组解理夹角不同，辉石为 87°和 93°，角闪石为 124°和 56°。

③辉石横断面为假正方形或假八边形，角闪石为菱形或假六边形。

④角闪石化学成分中含$(OH)^-$，或者含有置换$(OH)^-$的 F^-、Cl^-，而辉石则不含这些离子，因此，两者热学性质亦不同，角闪石具显著的吸热效应，而辉石没有。

另外，它们形成条件也不同，角闪石形成于富含挥发分的条件下，辉石则比角闪石的形成温度、压力要高。

在岩浆作用阶段，辉石主要产于基性和超基性岩中，与橄榄石、基性斜长石共生，而角闪石主要产于中、酸性火成岩中，与中—酸性斜长石、云母、石英共生。

在变质作用下，辉石产于较深的变质条件下，而角闪石产于中级变质相，在接触交代作用中，辉石形成较早，角闪石生成较晚。

在许多地质条件下，曾发现角闪石置换辉石，形成假象纤闪石。普通角闪石可呈普通辉石假象。

6.7.3 硅灰石族 $Ca_3[Si_3O_9]$

［化学组成］ CaO 48.3%、SiO_2 51.7%，成分较纯，有时含 Mg、Mn、Fe 等类质同象混入物。FeO 的含量可达 8%～10%，铁硅灰石、锂硅灰石是硅灰石的异种。

［晶体参数和结构］ 三斜晶系，$a_0=7.94$Å、$b_0=7.32$Å、$c_0=7.07$Å；$\alpha=90°02'$、$\beta=95°22'$、$\gamma=103°26'$；硅灰石的晶体结构是一种单链结构，每一硅氧四面体均以两个角顶与相邻四面体连接，但与辉石的单链不同，其一向连续的单链平行于 Y 轴延伸，其排列方式每隔 3 个四面体重复一次，且其中仅有一个四面体的棱平行于链的方向，Ca 离子作六次配位，形成配位八面体，八面体以棱相连，也作链状，但是相邻八面体的方位彼此偏斜。

硅灰石同质多象变体有 3 种：其中两种为低温变体即三斜晶系的硅灰石（α-$Ca_3[Si_3O_9]$）和单斜晶系的付硅灰石（α'-$Ca_3[Si_3O_9]$），另一种是高温变体的三斜假硅灰石（β-$Ca_3[Si_3O_9]$），转变温度 1126℃。

［形态］ 对称型 C，单晶体沿 Y 轴延伸呈板状、针状，常见单形为平行双面，但单晶晶体少见，常呈片状、放射状、纤维状集合体。

［物理性质］ 白色或带灰和浅红的白色，少数肉红色，玻璃光泽，纤维状集合体呈丝绢光泽，解理平行{100}完全，{001}、{$\bar{1}$02}中等，在{010}面上的解理交角为(100)∧(001)＝84.5°，(100)∧($\bar{1}$02)＝70°，硬度 4.5～5.5，比密度 2.87～3.09，熔点 1540℃，已知含 Mn 0.02%～0.1%的硅灰石能发出强的黄色阴极浅荧光，遇浓 HCl 可以分解，并形成絮状物，这是与透闪石不同的地方。

［鉴定特征］ 根据其浅色、板状晶形、解理交角、成因产状及共生矿物等特征予以鉴别，与透闪石、透辉石的区别可根据解理夹角以及硅灰石易溶于酸。

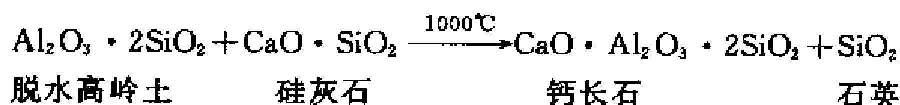
［用途］ 在陶瓷工业方面，作为一种熔剂成分用于坯料和釉料中，可增加坯与釉的结合作用，降低瓷化温度，增加强度，减少收缩和吸水膨胀等，并能使釉的光泽性加强，提高釉的硬度。此外，硅灰石也是一次低温快烧建陶的优质原料。

硅灰石工艺特性如下：

①硅灰石本身不含有机物、吸附水、结晶水、构造水等，干燥收缩、烧成收缩小。

②硅灰石的 $\alpha_{膨}=6.5\times10^{-6}/℃$，很小，且随温度升高呈直线关系，变化均匀。

③硅灰石和粘土配料在高温下生成钙长石与方石英。



$$Al_2O_3\cdot2SiO_2+CaO\cdot SiO_2\xrightarrow{1000℃}CaO\cdot Al_2O_3\cdot2SiO_2+SiO_2$$

脱水高岭土　　　硅灰石　　　　钙长石　　　　石英

这一反应的体积收缩为 99%左右，很小，故适宜低温快烧。

④硅灰石为针状晶体，交叉排成网状，形成水分排出通路，可快速干燥，易压制成型。

⑤硅灰石具有良好的助熔作用，降低产品的烧成温度，用它代替石英、方解石配釉，不会因析出气体而产生过多釉泡、针孔等，若用量过多(＞18%)，影响釉面光泽。

⑥硅灰石的电阻值 $1.6\sim1.7\times10^{14}\Omega/cm$，介电损耗低，可制造低损耗电瓷。

⑦耐酸、耐碱、耐化学腐蚀，在浓盐酸中分解。

⑧硅灰石在相对低温下很容易与 SiO_2、Al_2O_3 共熔，减少热膨胀，降低产品收缩率，使其形状稳定。

实例一： 烧成温度1100℃一次低温快烧釉面砖坯体配方(%)：

硅灰石40、紫木节25、叶蜡石25、滑石10。

实例二： 烧成温度1250～1280℃卫生瓷釉料配方(%)：

长石40、石英24、硅灰石14、苏州土6、烧氧化锌5、滑石9、废瓷坯粉9、烧氧化锡7。

实例三： 烧成温度1250～1280℃白色无光釉(氧化焰烧成)配方(%)：

长石39、石英6、石灰石12、硅灰石10、高岭土24、骨灰3、菱镁矿6。

实例四： 烧成温度1300～1330℃瓷釉(还原焰烧成)配方(%)：

长石45、硅灰石7、石英23、高岭土11、滑石13、白云石1。

6.8 层状结构硅酸盐亚类

层状结构硅酸盐矿物内部构造的特点是硅氧四面体相互以三个角顶相连而形成在平面上多数呈六方网孔状的硅氧层，层内电价未被中和的活性氧一般都朝向网层的一侧，此部分的剩余负电价被硅氧层之外的金属阳离子中和，形成八面体层，而与硅氧四面体相接。

根据硅氧层和阳离子组合的特点，可分为三层型和二层型两种基本构造类型。

三层型：是由上下两层硅氧四面体层夹着一层主要为镁或铝的阳离子形成的八面体所组成(图2.6.11(*b*))。上、下硅氧四面体层的活性氧相对分布，镁、铝等阳离子充填在构造空隙中，以中和其负电价，从而形成电性中和的单元构造层，单元构造层内为共价键和离子键，单元构造层之间为分子键，三层型层状硅酸盐就是无数个这样的单元构造层沿Z轴重叠而成，如滑石、叶蜡石等即属这种构造。

二层型：比三层型少一层硅氧四面体层，所以它的单元构造层就是由一层硅氧四面体层和一层镁或铝离子形成的八面体层所组成(图2.6.11(*a*))，高岭石、蛇纹石即属这种构造。

根据基本构造类型和单元构造层间的情况，又可把层状硅酸盐分为四种主要结构类型：

①高岭石型结构(图2.6.11(*a*))，单元构造层是二层式，三角形层表示硅氧四面体层，长方形代替阳离子组成的八面体层，它可以分别用氢氧镁石层或氢氧铝石层表示之，单元构造层之间，没有其他的离子存在，也很少有水分子或其他有机分子存在。

②滑石-叶蜡石型结构(图2.6.11(*d*))，单元构造层是三层式，但单元构造层之间有层间水存在。滑石族、叶蜡石族、水云母族、蛭石族和蒙脱石族属于此类型。

③云母型结构(图2.6.11(*e*))，单元构造层是三层式，但层间出现K离子。

④绿泥石型结构(图2.6.11(*f*))，单元构造层是三层式，但在单元构造层之间，又出现了新的氢氧镁石层填充其间，所以它是三层式单元构造层与单层式的复合物，也可以看成是四层型单元构造层。

层状结构硅酸盐的共同特征：

①组成成分　作为阳离子成分的以镁和铝为主，此外，替换这些阳离子的有铁、镍、锰、锂、铬和矾。当构成层状的硅氧四面体部分地被铝氧四面体置换时，即由$[Si_2O_5]$或$[Si_4O_{10}]$转变为$[Al_nSi_4-nO_{10}]$时，那么即有钾、钠、钙加入。

在阴离子部分，除有络阴离子团外，经常有附加$(OH)^-$或置换部分$(OH)^-$的氟离子存在，这一成分特点类似于角闪石族矿物。

某些层状结构硅酸盐的单元构造层之间，往往存在有水分子，即所谓层间水，这种层间水

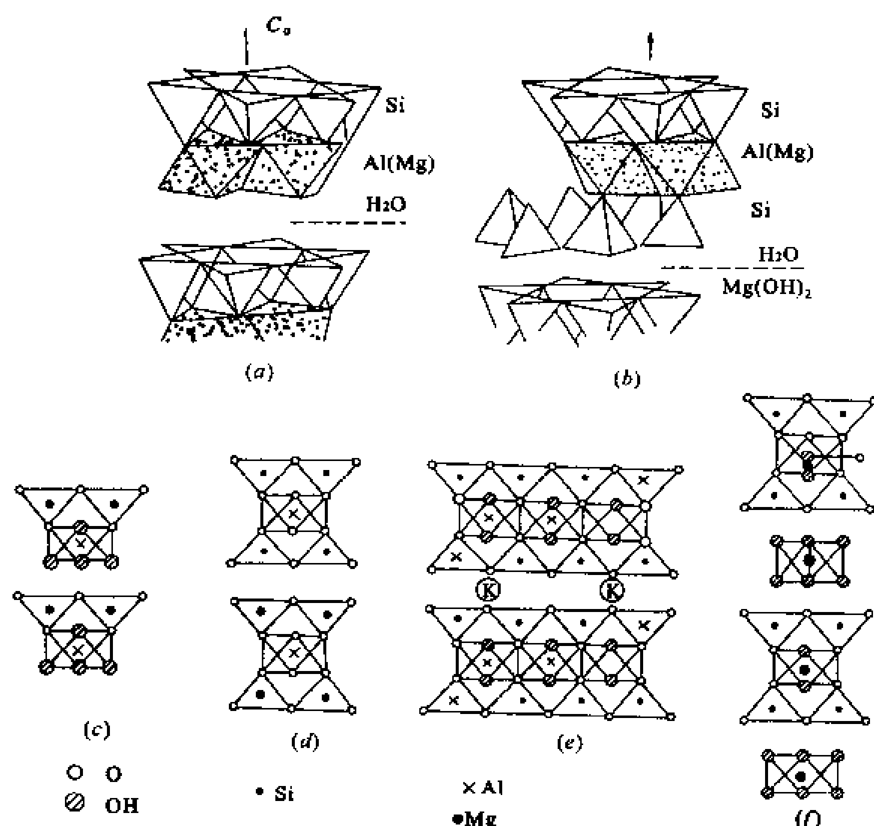


图 2.6.11 层状硅酸盐结构中的硅氧四面体层和阳离子配位八面体的连接方式

(a) 双层型结构单元层；(b) 三层型结构单元层；(c) 高岭石结构示意图；

(d) 叶蜡石结构示意图；(e) 白云母结构示意图；(f) 绿泥石结构示意图

和构造中的$(OH)^-$，当加热到一定温度时，都会逸出，不同的矿物，H_2O和$(HO)^-$的量也不同，逸出的温度也不相同，这就是粘土矿物(高岭石、蒙脱石等)热分析的原理。高岭石吸附水分子极少，但多水高岭石和蒙脱石中却能大量吸附，不仅吸附水分子，而且还能吸附其他阳离子或有机质等。

由于层间水的含量不同，因而影响到晶胞参数的变化，如钙蒙脱石，当它完全脱水时，c_0约为9.6Å，但当层间含有双层的水分子则c_0在15Å左右；又如蛭石，充分水化时，c_0约为28.4Å，随着水分子的脱失，c_0值渐次变为27.6Å、23.2Å，至完全脱水时，c_0则为18.5Å。这种特性，不仅使这类矿物具有广泛的应用价值，并且也是鉴定工作中的依据之一。

②形态和物理性质　层状结构硅酸盐的许多性质，是由其特殊的层状结构所决定的。形态上大多数属单斜晶系，形成假六方片状、短柱状等，在物理性质上都具一组平行{001}极完全底面解理。硬度低，含水者更低，比密度一般均不大，含水者更小。解理薄片一般具有挠性和单性。

③成因和产状　由于本亚类矿物成分中都含OH^-和H_2O，尽管各种地质作用中，都会有层状结构硅酸盐的形成，但以表生条件最为有利，因为表生条件最富于水。如长石，经常转变成粘土矿物，辉石、角闪石经常蚀变成绿泥石，石榴子石也会蚀变风化成绿泥石。所以层状结构硅酸盐在表生作用下分布得更广泛，具有较大的稳定性。

④研究方法　层状结构硅酸盐易于根据其形态、颜色、硬度低等特点加以识别，但是同族矿物之间的区别，或者颗粒极细时，是难以利用外表特征和一般显微镜进行鉴定的。可靠的鉴

定途径，有下列几种：一是利用电子显微镜，主要研究微粒的形态与大小，如高岭石呈假六方片状，而多水高岭石则呈管状；二是利用低角度的粉晶数据，测定其 c_0 值，如高岭石 c_0 为 7.4Å，水云母 c_0 为 10Å 左右，但若温度情况不同，则有所不同；三是利用热分析数据，这类矿物进行热重试验和差热分析时，会有不同的反应；四是利用离子交换性能与吸附有机物的性能。只有综合利用这些方法，配合化学分析资料，才能取得确切的结果。

6.8.1 滑石族

滑石 $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$

[化学组成] MgO 31.72%、SiO_2 63.52%、H_2O 4.76%，其化学成分比较稳定，Si 有时被 Al 或 Ti 所代替(Al 可达 2%，Ti 达 0.1%)；Mg 经常被 Fe 及少量 Mn、Ni、Al 所代替(FeO 达 5%，Fe_2O_3 达 4.2%，NiO 达 1%)。有时含有少量的 K、Na、Ca，这些元素很大的可能是位于滑石层之间或是机械混入物。

[晶体参数和结构] 单斜晶系，$a_0=5.27$Å、$b_0=9.12$Å、$c_0=18.85$Å，$\beta=100°00'$，滑石结构见前述及(图 2.6.11(d))，与叶蜡石不同处在于 $Mg_3(OH)_6$ 的"氢氧镁层"代替叶蜡石的 $Al_2(OH)_6$ 的氢氧铝层。

[形态] 对称型 L^2PC 或 P，晶体呈假六方或复形片状，但少见。集合体呈致密块状、片状、鳞片状，致密块状的滑石称块滑石。

[物理性质] 白色，或带浅绿、浅褐、浅黄等色调。颜色的变化主要由杂质引起，玻璃光泽、致密块状者常带蜡状光泽。解理平行{001}极完全，解理面具珍珠光泽，解理片具挠性，硬度 1，比密度 2.7～2.8，具滑感，电绝缘及耐热、耐酸性能较高。

[鉴定特征] 以低硬度、滑感、较浅的颜色、片状，具有一组极完全解理为其特征。与叶蜡石相似，区别它们在于用硝酸钴法，滑石灼烧后与硝酸钴作用变为玫瑰色(镁的反应)，而叶蜡石则呈蓝色。还可用简单的研磨 PH 值法，叶蜡石的 PH 值为 6，滑石的 PH 值为 9。

[用途] 陶瓷工业中，是制造镁质瓷的主要原料，还可调制釉料提高釉的透明度和白度，降低釉料的熔融温度和高温粘度及热膨胀系数，同时，可降低坯料的烧成温度，扩大烧结范围，同时，还可广泛地应用于造纸工业、橡胶工业，油毡及油漆染料工业、农业、铸造业、香料业及制药工业等。

实例一：烧成温度 1080～1100℃一次低温快烧陶质釉面砖坯体配方(%)：

硅灰石 45、白泥 25、滑石 25、石英 5。

实例二：烧成温度 1120℃滑石质釉面砖坯体配方(%)：

滑石 40、东湖泥 10、紫木节 10、彰武土 20、石英 15、石灰石 5。

实例三：烧成温度 1140～1160℃低温生料釉配方(%)：

石英 15、长石 52、烧滑石 3、石灰石 9、氧化锌 9、苏州土 5、萤石 3。

实例四：烧成温度 1200～1250℃无光金属状黑釉配方(%)：

长石 36、石灰石 9、滑石 16、白云石 5、硼酸钙 5、碳酸钡 8、石英 16、膨润土 5、硅酸锆 15、金红石 20、氧化钴 3、氧化锰 2、氧化铁 3。

6.8.2 叶蜡石族

叶蜡石 $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$

［化学组成］ Al_2O_3 28.3%、SiO_2 66.7%、H_2O 5.0%。成分稳定，但有少量 Al 替换 Si，少量的 Mg、Fe^{2+}、Fe^{3+} 替换 Al，当少量的 Al 取代 Si 以后，引起正电荷之不足，因而就可能出现少量的 Na、K 或 Ca，用以补偿正电荷之不足，它们在叶蜡石中的位置还不很清楚，很可能像云母成分中 K 的状态，充填在层间。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0=5.15$Å、$b_0=8.92$Å、$c_0=18.59$Å，$\beta=99°55'$，叶蜡石晶体结构见图 2.6.11(d)。

［形态］ 对称型同滑石，单晶体极为罕见，集合体呈片状、放射状或致密块状。呈隐晶质块体的叶蜡石俗称寿山石、冻石等。

［物理性质］ 纯者白色或呈黄色、浅蓝或灰色。玻璃光泽，硬度 1～2，比密度 2.65～2.9，性柔具滑感，解理平行{001}极完全，薄片具挠性，无弹性。

加热体积剧烈膨胀，颜色变白，会分裂成极细的小片，能生成莫来石：



$$3Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \xrightarrow{150℃} 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 10SiO_2 + 3H_2O$$

同时，叶蜡石绝缘性好。加水后不能水化，故无膨胀性。对有机分子也不能吸附，所以难以染色。

［鉴定特征］ 与滑石相似，唯硬度较滑石稍高，与滑石区别见前面滑石描述。

［用途］ 基本同滑石，色泽鲜艳的寿山石、青田石是重要的雕刻原料。

在陶瓷工业中，叶蜡石是一次低温快烧建陶和卫生瓷重要原料，此外，叶蜡石可部分代替滑石，其工艺特性如下：

①结晶水少，加热时脱水缓慢，未烧结前，一定范围内产生线膨胀，这种性能可抵消在烧成过程中由于其他物料(粘土、熔剂等)所造成收缩，扩大烧成范围，保证产品尺寸一致。且能降低坯体的热膨胀系数，减少坯体吸温膨胀。

②叶蜡石细磨稍有塑性，泥浆易稀释，流动性好，便于浇注。叶蜡石不被水浸润，粘结力差，泥浆渗透性好，吸浆快，坯体干燥收缩小且便于控制，故是卫生瓷优质原料。

③叶蜡石熔点高，耐火度达 1700℃以上，可提高瓷坯烧成温度范围。

④叶蜡石导热、电导率低，绝缘性好，介电性能好，高频电流下，介电损失率小。

⑤具有良好的化学稳定性(特别是强酸条件下)。

⑥有良好机械加工、粉碎、磨细性能，磨成粉后具有高度的润滑性。

⑦粉末为白色，越细白度越高，焙烧后白度提高。

实例：烧成温度 1120～1150℃一次低温快烧釉面砖坯体配方(%)：

叶蜡石 63、黑粘土 13.5、粘土 13.5、石灰石 8、滑石 2。

6.8.3 云母族

云母族矿物是自然界分布广的造岩矿物之一，云母族的化学成分可用 $R^+R_2^{3+}[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 和 $R^+R_3^{2+}[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 通式来表示。

R^+：K　Na

R^{2+}：Mg^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、Ba^{2+}

R^{3+}：Fe^{3+}、Al^{3+}、Mn^{3+}，偶尔有 Cr^{3+}、V^{3+} 等，在某些情况下，$2Mg^{2+}$ 可被 1 个 Li^+ 和 1 个 Al^{3+} 所置换。

云母的构造和滑石构造相似，亦为三层式(图 2.6.11(e))，其不同点是单元构造层中硅氧四面体中的 1/4Si^{4+} 被 Al^{3+} 代替，因而使单元构造层中多出了一个负电价，为了达到电价平衡，在单元构造层之间有 K^+ 等阳离子加入，因此这样的构造层之间连接比较稳固，因此具有比滑石大的硬度，而且{001}极完全解理片一般具弹性。

由于云母族各矿物内部构造的相似性，因而在形态和物理性质等方面有许多共同特征，均为单斜晶系，呈假六方形片状或板状，有时呈假六方柱状。常按云母律形成双晶，双晶轴平行(001)，而与(001)和(110)交棱垂直，亦可按此双晶律形成穿插三连晶。云母硬度 2～3，{001}解理极完全，并有弹性，比密度 2.8～3.4，玻璃光泽，解理面上为珍珠光泽。

云母族矿物在地壳中分布很广泛，约占地壳总重量的 3.8%，能在岩浆作用、沉积作用和变质作用下形成。

根据化学成分不同，可分为下列各类。

白云母亚族：

白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

黑云母亚族：

黑云母 $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

金云母 $KMg_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

锂云母亚族：

锂云母 $KLi_{1.5}Al_{1.5}[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$

铁锂云母 $K(Li,Fe^{2+},Al)_3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$

白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

[化学组成]　K_2O 11.8%、Al_2O_3 38.5%、SiO_2 45.2%、H_2O 4.5%。类质同象代替相当广泛，K 可被 Na、Rb、Cs、Ba、Ca 等离子替换，若 Na>K 者称钠云母，同时含少量 Fe^{2+}、Cr、V、Mg、Fe^{3+} 等混入物，含 Cr 高者称铬云母(Cr_2O_3 含量达 4.8%)

[晶体参数和结构]　单斜晶系，$a_0=5.19\text{Å}$、$b_0=9.00\text{Å}$、$c_0=20.10\text{Å}$，$\beta=95°11'$。

[形态]　对称型 L^2PC，单晶体板状、片状、柱状，横切面为假六边形或菱形，集合体呈片状、鳞片状。呈极细小的鳞片状者称为绢云母，具丝绢光泽，双晶常见，多为接触双晶。

[物理性质]　薄片无色透明，含杂质者则微带浅黄、浅绿、浅红、浅灰等色，玻璃光泽、解理面珍珠光泽，硬度 2～3，平行{001}解理极完全，薄片具弹性，比密度 2.76～3.1。绝缘隔热性能好，难溶于酸。

[鉴定特征]　形态、解理及薄片具弹性为其特征。根据颜色与其他云母相区别。与浅色金云母的区别则利用光性数据和白云母在热浓硫酸中不分解，而金云母可分解的性质。

[用途]　作电气工业的绝缘材料，白云母在陶瓷原料中广泛存在。在绢云母质瓷中作为熔剂原料。强烈水化后变成伊利石可作粘土原料，白云母的存在对陶瓷工业无害，但会影响一些强度。

黑云母 $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

[化学组成]　K_2O 为 6.18%～11.43%、MgO 0.28%～28.34%、FeO 2.74%～27.6%、Fe_2O_3 0.13%～20.65%、Al_2O_3 9.43%～31.69%、SiO_2 32.83%～44.94%、H_2O 0.89%～4.64%、F 0～4%，类质同象置换广泛，使其组成很不稳定，变化范围相当大，其中还常具有 Ti、Na、Zn、Ba、Sn、Cs 等。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0=5.3\text{Å}$、$b_0=9.2\text{Å}$、$c_0=10.2\text{Å}$，$\beta=100°$，黑云母的晶体结构与白云母结构相似，不同点在于其八面体层位置全部被 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子所占据。

［形态］ 对称型 L^2PC 或 P，晶形、集合体形态、双晶等均与白云母相似。

［物理性质］ 由于黑云母含 Fe 较高，故呈深色——黑色、深褐色、红棕色。其他性质如解理、硬度、光泽等与白云母相似。比密度 2.7～3.3，稍大于白云母和金云母，黑云母的绝缘性较差，远不及白云母或金云母，所以黑云母虽然可以形成巨大的单晶体，且也能剥成薄片，但电气工业上却不能应用。此外强酸也能使之腐蚀并脱色。

［鉴定特征］ 同白云母，与白云母、金云母区别是黑云母颜色较深，为黑色、深褐色。

［用途］ 黑云母因含铁量高，绝缘性能差，不利于电气工业利用，但黑云母细片常用作建筑材料充填物，在陶瓷原料中也广泛存在，属有害物质，呈细小的鳞片状分布在瓷坯中，难以磨碎，在产品表面造成黑斑和熔洞，影响产品质量。

金云母 $KMg_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

［化学组成］ 是富含镁的云母，K_2O 7%～10.3%、MgO 21.4%～29.4%、Al_2O_3 10.8%～17%、SiO_2 38.7%～45%、H_2O 0.3%～5.4%、F 0～6%，成分不稳定，类质同象代替广泛，代替 K 的有 Na、Ca、Ba，替代 Mg 的有 Ti、Fe^{2+}、Fe^{3+}，含 Mn 也较高，特高者称含锰金云母，富铬变种称铬金云母。

金云母颜色为黄褐色、红棕色，不导电，耐高温，但能被浓 H_2SO_4 所腐蚀。

金云母晶体结构、形态及其他物理性质同黑云母。

［鉴定特征］ 根据颜色和产状可与其他云母区别，但浅色金云母与白云母区别是，白云母在热浓硫酸中不分解，金云母分解。

［用途］ 质纯的金云母与白云母一样是电气工业上的上等绝缘材料，其他用途亦同白云母。

锂云母 $KLi_{1.5}Al_{1.5}[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$，亦称鳞云母

［化学组成］ K_2O 4.82%～13.85%、Li_2O 1.23%～5.9%、Al_2O_3 11.3%～28.82%、SiO_2 46.9%～60.06%、H_2O 0.65%～3.15%、F 1.36%～8.71%，成分变化较大，在混入物中有 Cs_2O、Rh_2O 等。

［晶体结构］ 锂云母晶体结构的基本特征与白云母类似，差别在于锂云母结构中八面体位置为 Li、Al 等离子所充满。

［形态］ 晶体呈板状、短柱状，但少见，常呈片状和鳞片状集合体。

［物理性质］ 常呈浅紫色，有时为白色、桃红色(含 Mn)，比密度 2.8～2.9，其他性质同白云母。

［鉴定特征］ 浅紫色为主要特征，其他特征同云母族矿物，与其他云母的区别可以借助于火焰反应，灼烧时火焰呈洋红色(Li)。

［用途］ 是提取稀有金属锂的主要原料之一。同时锂云母中常含 Rb 和 Cs，所以也是提取 Rb、Cs 的主要原料，在陶瓷工业中，由于含 Li_2O，可作熔剂原料，其作用同锂辉石。

实例：烧成温度 1320℃日用瓷釉料配方(%)：

长石 39、石英 23、釉果 5、大同砂 6、福建泰宁土 8、烧滑石 11、氧化锌 1.5、石灰石 0.5、宜春锂云母 6。

6.8.4 水云母族(伊利石族)

关于水云母族的问题，一直有所争论，有的认为，云母水化以后，如果作用并不强烈，仍保留有云母的特色时，此种水云母应视为云母族矿物的亚族，若水化作用强烈则应归于另一族——水云母族(又称伊利石族)。

水云母族为类似云母的矿物(包括水白云母、水黑云母、蛭石、海绿石等)，其结构与云母很相似，只双层之间 K 阳离子数目少于 1(因双层中只有 1/6 左右 Si^{4+} 为 Al^{3+} 所代替)和有水分子存在，是水化了的层状结构矿物。本族矿物大部分是在风化壳中生成，也有在低温作用下生成者，一般由云母或类似云母矿物变化而来，云母类矿物变化是逐渐发生的，当云母处在酸化的水里时，一部分 K 转入溶液，同时，吸附一部分水，就形成了水云母，水云母进一步风化将转变成高岭石，但亦有一些水云母矿物(如海绿石)是在海洋沉积过程中形成的。

水云母族是一种粘土矿物，是陶瓷工业粘土原料的主要来源之一，它的性质是可塑性差、结合性差、耐火度低、烧失量少、干燥收缩小、烧结温度范围窄(因含 K、Na 之故)。

水白云母(伊利石)$KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2, nH_2O$

[化学组成] 成分不固定，是白云母的风化产物，与白云母相比，钾显著减少而水明显增多，成分大致为 $K_2O>6\%$、H_2O 8%～9%、SiO_2 50%～55%、Al_2O_3 25%～33%。

[晶体参数和结构] 单斜晶系，$a_0=5.2Å$、$b_0=9.0Å$、$c_0=10.0Å$，$\beta=96°$。晶体结构与白云母类似。

[形态] 晶体呈细小鳞片或片状，电子显微镜下常现不规则的集合体，类似蒙脱石，个别鳞片呈六方形，大小在 1～3μm 之间。集合体呈土块状。

[物理性质] 白色，因杂质而染成黄、绿、褐色，块状体可呈油脂光泽，硬度 2～3，比密度 2.5～2.8，有滑感，贝壳状断口，解理平行{001}完全，片状水白云母弹性比白云母低。

热分析：差热曲线如图 2.6.12 所示，在 150°左右失去吸附水形成一明显的吸热谷，在 650℃左右范围内失去结构水，造成第二吸热谷，第三个吸热谷形成于 900～1100℃之间，形态较小，有些水云母矿物于 950～1200℃左右尚有一小的放热峰，可能是非晶体转化为晶体所放出热量所致。

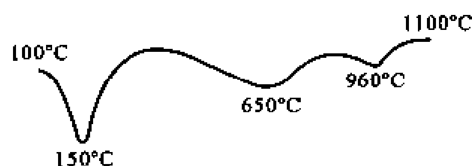


图 2.6.12 水白云母的差热曲线

[鉴定特征] 水白云母与其他粘土矿物的区别，单凭肉眼观察是难以鉴定的，需借助于差热分析、X 射线分析等手段。

[用途] 在陶瓷工业中是低熔点粘土原料，可作为优良的可塑性原料。

蛭石$(Mg^{2}, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$

[化学组成] 成分变化很大，除含 MgO、SiO_2、Al_2O_3、H_2O 之外，常含有 Fe_2O_3、FeO 和 K_2O、CaO、NiO、TiO_2、Na_2O 等。

[晶体参数和结构] 单斜晶系，$a_0=5.3Å$、$b_0=9.2Å$、$c_0=28.9Å$，$\beta=97°$。

蛭石的晶体结构与滑石相似，不同的是由于四次配位的 Al 可代替 Si，因而常常以 Mg、Ca 以及 Na 等阳离子来平衡电价，它们分布于结构单位层之间，为交换性阳离子，此外，结构层间还有水分子存在，其含量较为固定，层间水分子的含量最高可相当于两层水分子，其间为交换性阳离子所联结。每个水分子以氢键与结构单位表面的一个氧联结，在同一个水分层内以弱

的氢键相连，蛭石的这种特性，使蛭石的阳离子交换能力特强。

［形态］ 对称型P，晶体呈假六方形的板状、片状，集合体常呈黑云母或金云母的假象。

［物理性质］ 褐色、黄褐色，有时带绿色，油脂光泽或珍珠光泽，硬度1～1.5，解理平行{001}，但不及云母发育，薄片无弹性，具挠性，比密度2.4～2.9。

蛭石最有特征的是加热后体积膨胀并弯曲的性质，急速加热时，由于层间水分子的气化所形成蒸气压，使体积膨胀15～25倍或更大。与此同时晶体发生弯曲，形状似蚂蝗，故名“蛭石”。灼烧后显银白色，似金属光泽，比密度迅速下降到0.6～0.9间，可以漂浮于水面上。此种经过焙烧后的蛭石，具有极高的绝热性能，远胜于石棉，隔音性能也很高，蛭石的工业用途主要是利用这些特有的性质。

［鉴定特征］ 外形极似黑云母，主要以薄片不具弹性和灼烧后体积强烈膨胀为其主要特征。

［用途］ 蛭石是良好的绝热隔音材料，用于建筑方面，也用于造纸和涂料中。

6.8.5 高岭石族

本族矿物除高岭石外，还包括珍珠陶土、地开石和富硅高岭石在内。前两种矿物一直都认为是高岭石的同质多象变体，但实质上只是不同的多型而已。其中以高岭石最为常见。

高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$

高岭石名称来自我国江西景德镇市的高岭村，因该地所产高岭石质地优良，在国内外久享盛名。

［化学组成］ Al_2O_3 39.5%、SiO_2 46.5%、H_2O 14%，常含有Fe^{3+}、Fe^{2+}、Mn^{4+}、Mn^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Ti^{4+}等。由于高岭石的粒径很细，可以胶体微粒，所以能吸附其他杂质。

［晶体参数及结构］ 三斜晶系，$a_0=5.15Å$、$b_0=8.95Å$、$c_0=7.39Å$，$\alpha=91°48'$、$\beta=104°30'$、$\gamma=90°$。高岭石晶体结构特点如图2.6.11(*c*)所示，属双层型单元结构层，层间没有其他阳离子和水分子的存在。

高岭石单元结构层堆积时可以有多种方式，一种是毫无位移的平行叠置，另一种是沿*a*及*b*有一定位移的叠置，这样便产生了多型现象。

地开石和珍珠陶土的化学成分与高岭石完全相同，只是堆积的方式不同而已，因而在晶体参数表现上就有所差异，地开石：单斜晶系，$a_0=5.15Å$、$b_0=8.95Å$、$c_0=14.42Å$，$\alpha=90°$、$\beta=96°50'$、$\gamma=90°$。珍珠陶土：单斜晶系，$a_0=5.15Å$、$b_0=8.96Å$、$c_0=43.0Å$，$\alpha=90°$、$\beta=91°43'$、$\gamma=90°$。

［形态］ 对称型L^1或*C*，多为隐晶质致密块状或土状集合体，晶体微小，通常大小在0.2～5μm，在电子显微镜下，可见到假六方鳞片状或板状晶体，有时也呈弯曲柱状晶体。

［物理性质］ 致密块状，土状呈白色，常因含杂质而染成浅黄、浅灰、浅红、浅褐、蓝等色调，土、块状者为土状光泽，硬度1～3，{001}解理完全，比密度2.6～2.68，具土臭味及粗糙感，干燥时有吸水性（粘舌），潮湿后有可塑性，但不膨胀，易搓成粉末，在水中生成悬浮体。

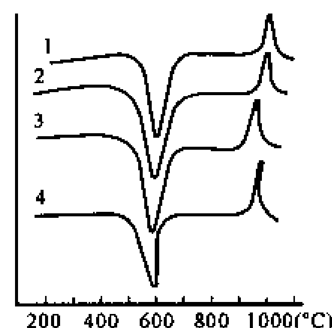


图2.6.13 高岭石的差热曲线
1—浙江温州；2—浙江瑞安；
3—江苏苏州；4—日本关白

热分析：高岭石的差热曲线如图2.6.13，在差热曲线上，500～600℃处有个明显的吸热谷，是$(OH)^-$以H_2O形式逸

出，导致高岭石晶格瓦解的效应。950～1000℃处有个明显的放热峰；有时在1230～1280℃处出现弱的放热效应，放热峰是从游离 Al_2O_3 和 SiO_2 中生成新矿物 $C\gamma\text{-}Al_2O_3$，富铝红柱石、方英石的效应。高岭石热效应的峰谷温度随着粒度的变细而有所降低。

［成因］ 高岭石矿物分布很广，主要是由富含铝硅酸盐的火成岩和变质岩，在酸性介质的环境里，经风化作用或低温热液交代变化的产物，如钾长石在风化作用下生成高岭石反应式表示如下：



$$4K[AlSi_3O_8]+H_2O+2CO_2 \longrightarrow Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8+8SiO_2+2K_2CO_3$$

钾长石　　　　　　　　　　　高岭石

其次在低温热液作用下，当含 CO_2 的酸性水溶液作用于不含碱的铝硅酸盐和硅酸盐时，可引起高岭土化作用而形成高岭石。此时它常依长石、云母、黄玉等成假象。

在变质过程中，高岭石可转变为云母、长石或红柱石、蓝晶石等。

高岭石矿床分原生和次生的两种。原生高岭石矿床是铝硅酸盐破坏的产物停留在母岩当地，此时，高岭石常和石英、褐铁矿等混杂。如果原生高岭石遭受冲洗，被水携带搬运至低地沉积，则生成次生高岭石矿床，此种矿床较纯，几乎只含高岭石，原生矿床的高岭石需经特殊的淘洗才能用在工业上，而次生高岭石，可不经淘洗，直接用于工业上。

［鉴定特征］ 致密土块状，粘舌，易搓成粉末，加水具可塑性，灼烧后与硝酸铝作用呈蓝色（Al的反应）。但与其他粘土矿物的区别，凭肉眼难以区分，需借助X射线分析、差热分析、电子显微镜等方法进行。

［用途］ 高岭土具有强的可塑性，高的耐火度，良好的绝缘性和化学稳定性，熔烧后呈白色，是陶瓷工业最主要的可塑性原料和耐火材料，在釉料中有良好的悬浮性能。此外，还用于橡胶工业、化学工业、造纸工业及钻探工程中。

6.8.6 蛇纹石族

蛇纹石 $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$

［化学组成］ MgO 43.0%、SiO_2 44.1%、H_2O 12.9%，类质同象混入物主要有Al、Fe、Mn、Ni、Cr和F，有时含少量Cu、Ge等。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0\approx5.3$Å、$b_0\approx9.2$Å、$c_0\approx7.3$Å，$\beta\approx90°\sim93°$。蛇纹石属于二层型，与高岭石的晶体结构相似，其主要差别在于八面体层为“氢氧镁石”层，其中全部八面体空隙为Mg所充填。另外，结构层卷曲成管状结构最为明显。

［形态］ 对称型 P 或 L^2PC，单晶体罕见，通常呈细鳞片状、致密块状集合体或呈现具胶凝体特征的肉冻状块体。呈鳞片状者，多为叶蛇纹石，呈纤维状者叫纤维蛇纹石，亦称蛇纹石石棉或温石棉。

［物理性质］ 呈各种色调的绿色（深绿、黄绿、黑绿），常具有蛇皮状青、绿色的斑纹。块体呈油脂光泽或蜡状光泽，纤维蛇纹石具丝绢光泽，硬度2～3，比密度2.55左右，解理仅在叶蛇纹石中发育，具有{001}解理完全，在酸中可被腐蚀，蛇纹石石棉可裂成细长纤维，具耐火性、耐碱性和绝缘性。蛇纹石和高岭石一样，在单元结构层间一般不吸附水，但在纤维之间或细片之间可以吸附少量的水，使其脱水则需要较长时间的烘干。在空间中加热时，大约在600℃左右，即转变成橄榄石。

［成因］ 蛇纹石主要由超基性岩，经热液蚀变而成，此种作用称为蛇纹石化，橄榄石、斜方

辉石最易变成蛇纹石，反应如下：



$$3\,Mg_2[Si_4]+H_2O+SiO_2 \longrightarrow Mg_6\,[Si_4O_{10}](OH)_8$$

镁橄榄石　　　　　　　　　蛇纹石

此外，白云质灰岩或白云岩受热液影响，亦可形成蛇纹石：



$$6CaMg[CO_3]_2+4H_2O+4SiO_2 \longrightarrow Mg_4\,[Si_4O_{10}](OH)_3+6CaCO_3+6CO_2$$

白云石　　　　　　　　　　蛇纹石　　　　方解石

［鉴定特征］ 以颜色、低硬度、光泽及成因产状为其特征。蛇纹石石棉与角闪石石棉的区别是蛇纹石石棉易溶于 HCl，角闪石石棉则不溶。此外，蛇纹石石棉研磨后，粘合成薄片而角闪石石棉研磨后可以呈粉末状。

［用途］ 蛇纹石石棉在工业上用途很广，主要用于隔热、保温和防火等方面。色泽美丽者用作工艺雕刻材料。含 SiO_2 少的蛇纹石可做冶金上的耐火砖，同时也是制钙镁磷肥的主要原料。

在陶瓷工业上的应用，还有待研究，有的资料认为它可以代替配料中的烧滑石使用，也可与粘土调配作一般瓷用原料。

6.8.7 多水高岭石族

多水高岭石（又称叙永石或埃洛石）$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8\cdot 4H_2O$

［化学组成］ Al_2O_3 34.7%、SiO_2 40.8%、H_2O 24.5%，混入物有 Fe、Mg、Ca 及 Cr、Cu、Na、K 等。因易于脱水，成分中 H_2O 的含量有变化，但不超过 $4H_2O$。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0\approx5.15$Å、$b_0\approx8.9$Å、$c_0\approx10.1\sim10.25$Å，$\beta\approx100°12'$。晶体结构与高岭石相似，可看成是被水分子层隔开的高岭石结构。

［形态］ 对称型 P，致密块状、土状、粉末状集合体，电子显微镜下，其晶体由板状晶体卷曲而呈长棒状、管状，系因构造层卷曲的结果。

［物理性质］ 白色，因含杂质而带各种颜色，如黄、红、绿、蓝等色，硬度 1～2，土状光泽或脂状光泽，有滑感、脆性、粘舌，比密度 2.0～2.6，不具有膨胀性，加水后裂开呈棱角状，失水后不再吸水，遇 H_2SO_4 较易溶解。

热分析：多水高岭石的差热分析曲线与高岭石不同，如图 2.6.14 所示，在 120～140℃及 560～580℃，有两个明显的吸热谷，系脱失吸附水和结构水所致，950～960℃有个明显的放热峰，系形成 γ-Al_2O_3 和方英石的效应。在温度 1000℃条件下熔烧 24 小时之后，也可形成富铝红柱石。

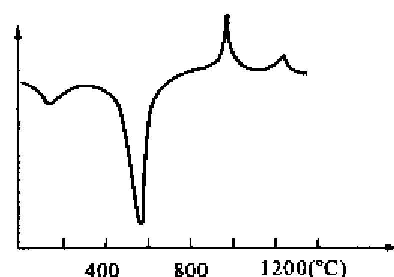


图 2.6.14 多水高岭石的差热曲线

［成因］ 多水高岭石是典型的表生矿物，最常见于基性火成岩（辉长岩、辉绿岩）和某些 Mo、Ni、Zn 矿床的风化壳中，成为不大的透镜体产出，此外，也产于富铝及富铁的沉积粘土及煤系地层中，如我国四川省叙永县盛产此矿物，故又名为叙永石。

［鉴定特征］ 多水高岭石常与高岭石相伴生，有些情况下先形成多水高岭石，然后再被高岭石所替代，多水高岭石常与高岭石外形相似，难以区分，区别它们是靠热分析曲线和在电子显微镜下观察以及利用 X 射线粉晶数据。

［用途］ 是陶瓷工业粘土原料之一，但可塑性很差，当含有大量的 Cr、Ni、Cu 的变种可作为相应的矿床来开采。

6.8.8 蒙脱石族

蒙脱石族矿物的结构类型与叶蜡石、滑石的结构相似，属三层型，所不同的是单元结构层内的电荷并没有达到中和状态，因此在单元构造层的层间，必然要有一定数量的阳离子加入，同时还有大量的水分子存在，这就使蒙脱石族矿物在组成成分上、结构上以及物理性质等方面不同于其他粘土矿物。

蒙脱石族矿物包括蒙脱石、贝得石、囊脱石、皂石等。其中以蒙脱石最为重要，分布最广，实际利用也最多。

蒙脱石（胶岭石或微晶高岭石）$1/2(Ca,Na)0.66(Al,Mg,Fe)_4[(SiAl)_8O_{20}](OH)_4 \cdot nH_2O$

［化学组成］ 成分复杂，变化不定，四面体层中的 Si 可以被 Al 代替外，亦可被少量的 Ti、Fe^{3+} 代替，八面体层中的 Al 可以被 Fe^{3+}、Mg 以及 Zn、Li、Cr 等代替，在层间除能进入交换阳离子（Na、Ca 等）和 H_2O 以外，同时也能进入有机液体，蒙脱石所含大量层间水的量是可变的，湿度大时，含水多，湿度小时，含水少。层间水可以有一、二、三层，脱水后，如果湿度条件许可，又可复得，若脱水彻底（需在 600℃以上的高温），则难以复得。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0 \approx 5.23$Å、$b_0 = 9.06$Å、c_0 数值可变，β 角亦可变，有一个数据是 $c_0 = 9.95$Å，$\beta = 99°54' \pm 30'$，晶体结构与叶蜡石相同。

［形态］ 对称型 L^2PC，单晶体尚未发现。颗粒极细，属胶体微粒，在电子显微镜下呈线毛状或毛毡状及云雾状鳞片晶体。集合体呈隐晶质土状、块状。

［物理性质］ 白色、灰白色，因含杂质而染有黄、浅玫瑰红、蓝或绿等色，无光泽，硬度 1～2，比密度 2～3，有滑感，吸水膨胀，体积增加好几倍，变成糊状物，有很强的吸附能力和离子交换性能。

热分析：蒙脱石差热曲线如图 2.6.15 所示，100～250℃区间具一吸热谷，层间水绝大部分已被脱失，600～700℃区间具第二个吸热谷，为结构水$(OH)^-$全部逸出，800～900℃区间具第三个吸热谷，即蒙脱石结构破坏，进行分解，1000℃左右为一放热峰，形成尖晶石和石英。

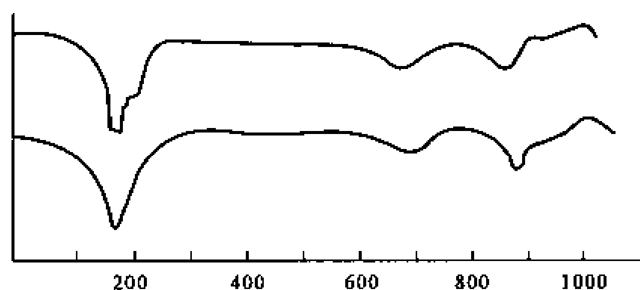


图 2.6.15 蒙脱石的差热曲线

［成因］ 蒙脱石主要是基性火山岩及凝灰岩等在碱性环境中风化的产物。它是膨润土及漂白土的主要成分。

蒙脱石并不是表生条件下最稳定的矿物，受地表水的长期淋滤，也会向高岭石转化。

［鉴定特征］ 加水膨胀为其特征，正确鉴定区分需结合 X 射线研究、电子显微镜下观察、差热分析及化学分析等方法。

[用途] 是陶瓷工业中粘土原料来源之一，它的特点是可塑性很强，结合性强，耐火度中等，烧失量大，干燥收缩大，一般陶瓷工业中蒙脱石用量小于5%。

实例：烧成温度1260～1280℃的玫瑰红色釉配方(%)：

长石35、石英23、苏州土5、膨润土2、滑石4、石灰石13、碳酸钡4、氧化锡5、铬锡红色料8。

由于具有膨胀性和吸附性，使之具有过滤、漂白、净化的能力，可用在石油工业上用来清除石油中的杂质，纺织工业上用来吸收油腻物，橡胶工业、肥皂工业、化妆品工业和造纸工业用作充填剂。

6.9 架状结构硅酸盐亚类

本亚类结构特征是每一硅氧四面体的所有四个角顶，均与相邻硅氧四面体的角顶相连，在完全没有其他离子替代硅氧四面体中的 Si^{4+} 时，Si 和 O 的原子数之比为 1：2，所以整个结构是电性中和的，这种情况只见于石英中(将在氧化物中介绍)，从晶体结构的观点看来，石英族矿物具有典型的 Si—O 架状结构，但从化学组成而言，它们是氧化物而并非硅酸盐矿物。

架状结构硅酸盐共同特点：

①架状结构中部分 Si^{4+} 被 Al^{3+} 代替，个别可被 Be^{2+} 等代替，在构造中出现了多余的负电价及较大的间隙，这就要求有低电价、大半径的阳离子如 Na^+、K^+、Ca^{2+} 或有 Cs^+、Rb^+ 等进入晶格，以中和电价。

为阴离子部分，除阴离子团 $[Si_3AlO_8]^-$、$[Si_2Al_2O_8]^{2-}$ 等外，有时还有附加阴离子如 F^-、Cl^-、$(OH)^-$ 以及 $[SO_4]^{2-}$、$[CO_3]^{2-}$ 等存在，这些附加阴离子不直接与四面体中的硅或铝连接，而是独立地与一价或二价阳离子相连系，以补偿构造中过剩的正电荷。

②在物理性质上，由于色素离子 Fe^{2+}、Mn^{2+} 等大多不参加晶格，故一般为白色、浅色。由于架状构造具有很大的空隙，分子体积大，故矿物的比密度不大，介于2～2.7之间，折射率不高。由于硅氧四面体排列的紧密程度仍具有方向性，故矿物具有解理。硬度在5～6之间，仅次于岛状硅酸盐。

6.9.1 长石族

长石族矿物广泛产出于各种成因类型的岩石中，约占地壳总重量的50%，总体积的60%，在火成岩中长石约占60%，变质岩中约占30%，在某些沉积岩中可达10%左右，故为极其重要的造岩矿物，因此，详细鉴别和研究长石对于岩石学的研究及对长石原料的利用都是非常重要的。

按化学组成来说，长石族是钾、钙、钠、钡的铝硅酸盐，即钾长石 $K[AlSi_3O_8]$(Or)，钠长石 $Na[AlSi_3O_8]$(Ab)，钙长石 $Ca[Al_2Si_2O_8]$(An)，钡长石 $Ba[Al_2Si_2O_8]$(Cn)，有时尚含微量的 Li、Cs、Rb、Sr 等类质同象混入物。

长石族中类质同象现象极为普遍，在上述四种主要成分形成一系列类质同象矿物，以它们为端员组分构成三个类质同象系列。

①钾钠长石系列，为 $K[AlSi_3O_8]$—$Na[AlSi_3O_8]$ 组合，亦称碱性长石系列，此系列在高温时，能以任意比例相混熔，组成完全类质同象系列，随着温度的降低，钾长石和钠长石的混熔性

逐渐减少，并熔离成钾长石和钠长石，构成条纹长石。

②钠钙长石系列（斜长石系列），为 $Na[AlSi_3O_8]$—$Ca[Al_2Si_2O_8]$组合，此系列在任何温度下均成连续类质同象系列。

③钾钡长石系列（钡冰长石系列），为 $K[AlSi_3O_8]$—$Ba[Al_2Si_2O_8]$组合，其端员成分在自然界产出很少，通常是少量钡离子在高温条件下以类质同象形式进入长石，构成有限类质同象系列。

而钾长石和钙长石几乎在任何温度下，都是不混熔的。

Or—Ab—An 系列的混熔性及同温度间的关系，如图 2.6.16 所示，它表明在不同温度下的相互混熔情况。

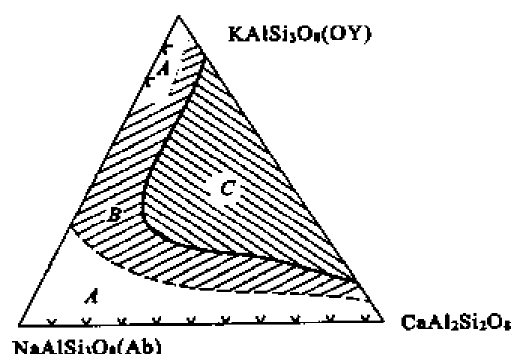


图 2.6.16 Or—Ab—An 系列混熔情况
A—在任何温度下稳定的晶体；
B—仅在高温下稳定的晶体；
C—不混熔区，晶体在任何温度下都不稳定

长石族矿物属单斜晶系和三斜晶系，其晶体常形成平行 X 轴的短柱状，平行{001}的厚板状，亦有呈平行 Z 轴的短柱状。长石双晶极为发育，特别是斜长石，几乎都呈双晶出现，长石有{001}和{010}两组完全解理，两组解理交角为 90°或近于 90°，大多为灰白色或肉红色，玻璃光泽，硬度 6～6.5，比密度 2.5～2.7，钡长石例外可达 3.29。

现就根据长石族三个系列（亚族），分别介绍如下：

1. 钾钠长石系列（亚族）

本亚族矿物主要为钾钠长石系列（即 Or—Ab 系列），靠近钾端员的矿物（钠端员矿物将在斜长石中叙述）

本亚族矿物在高温时形成 $K[AlSi_3O_8]$—$Na[AlSi_3O_8]$的连续类质同象系列，因 K^+(1.33Å)和 Na^+(0.98Å)的离子半径有显著差别，故当温度下降时，即发生分离，形成以钾长石为主和少量钠长石的条纹状规则连生体，称为条纹长石。当此两种长石含量相反（即钠长石为主，钾长石较少）时，则称为反条纹长石（或逆条纹长石）。

本亚族常见矿物有正长石、透长石、歪长石、钾微斜长石。

正长石 $K[AlSi_3O_8]$（钾长石）

由两组解理正交(90°)而得名，无色透明的低温度变种称冰长石。

［化学组成］ K_2O 16.9%、Al_2O_3 18.4%、SiO_2 64.7%，纯粹理论值少见，经常含钠长石分子，有时可达 30%，亦可见钙长石分子，并有伴随钠长石组分的增高而增高的趋势，也可见少量的钡长石组分，含量达 30%以上时称钡冰长石，此外，常有 Fe、Rb、Cs、Mn、Sr 等混入物。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0=8.562$Å、$b_0=12.996$Å、$c_0=7.19$Å，$\beta=116°09'$。

［形态］ 对称型 L^2PC，晶体常呈短柱状、厚板状，单形主要有斜方柱、平行双面，常形成卡斯巴双晶。

［物理性质］ 常为肉红色、浅黄红色、浅黄白色，玻璃光泽，条痕无色或白色，硬度 6～6.5，比密度 2.57，解理{001}和{010}完全，两组解理夹角 90°。

［鉴定特征］ 以红色、硬度大、两组解理正交及卡氏双晶为其特征，并以此与石英和霞石区别，与斜长石区别见斜长石描述。

［用途］　主要用于陶瓷工业和玻璃工业上，富钾长石的岩石也可作为提取钾肥的原料。

在陶瓷工业中，正长石的风化产物是粘土原料，它的本身是很好的熔剂原料，同时还可起瘠性原料的作用，正长石在陶瓷中作用可起到降低坯釉的烧成温度，扩大烧成范围，提高釉的流动性和光泽度，提高坯体的机械强度等作用。

实例一：1180℃烧成的外墙砖坯体配方（%）：

石英砂 30、红粘土 40、长石 20、硅灰石 10。

实例二：1250℃烧成的卫生瓷坯体配方（%）：

石英 28、长石 16、章村土 26、大同土 15、紫木节 10、滑石 5。

实例三：烧成温度 1330～1350℃（还原焰烧成）的日用瓷釉料配方（%）：

长石 50、石英 30、临川高岭土 8、滑石 8、氧化锌 3、石灰石 1。

实例四：烧成温度 1260℃的熔块配方（%）：

长石 10、石英 28、硼砂 15、锆英砂 10、氧化锌 7、石灰石 12、氟硅酸钠 3、苏州土 6、硝酸钾 3。

微斜长石 $K[AlSi_3O_8]$（钾微斜长石）

因{001}、{010}两组解理夹角为 89°40′，与直角之差为 20′，所以得名微斜长石。

［化学组成］　与正长石相似，常含钠长石组分约 20%，当 $Na_2O>K_2O$ 时称为钠微斜长石，有时成分中含 Rb_2O（可达 1.4%～3.3%）、Cs_2O（可达 0.2%～0.6%），并呈绿色，此异种称为天河石，绿色的深浅与 Rb 的含量多少有关。

［晶体参数与结构］　三斜晶系，$a_0=8.54$Å、$b_0=12.97$Å、$c_0=7.22$Å，$\alpha=90°39'$，$\beta=115°56'$，$\gamma=87°39'$。

［晶形］　对称型 C，晶形与正长石相似，正长石中出现的双晶在微斜长石中都有。另外，微斜长石还具有格子双晶。

［物理性质］　许多物理性质均同于正长石，只是{001}和{010}两组解理交角为 89°40′。

［鉴定特征］　微斜长石和正长石十分相似，但前者常见格子双晶，在偏光显微镜下，前者为斜消光，后者为平行消光（在⊥(010)切面上观察），此外，微斜长石的消光角大于正长石。

［用途］　与正长石相同，天河石是提取 Rb、Cs 的原料之一，有时可作装饰品或雕刻工艺品的石料。

2. 钠钙长石系列（亚族）（斜长石系列）

由端员矿物钠长石 $Na[AlSi_3O_8]$和钙长石 $Ca[Al_2Si_2O_8]$以及它们中间的矿物组成的连续类质同象系列，总称为斜长石，根据钠长石（A_b）和钙长石（A_n）二者相对含量的不同可将斜长石分为下列：

钠长石	A_b：100%～90%	A_n：0～10%
更长石	A_b：90%～70%	A_n：10%～30%
中长石	A_b：70%～50%	A_n：30%～50%
拉长石	A_b：50%～30%	A_n：50%～70%
培长石	A_b：30%～10%	A_n：70%～90%
钙长石	A_b：0～10%	A_n：90%～100%

在岩浆岩分类中，有时将斜长石按其中钙长石（A_n）组分含量约分三类：

酸性斜长石　　$A_n=0～30\%$

中性斜长石　　$A_n=30\%\sim50\%$
基性斜长石　　$A_n=50\%\sim100\%$

由酸性斜长石到基性斜长石，SiO_2 的含量逆减，如在花岗岩中常为酸性斜长石，在闪长岩中常为中性斜长石，在辉长岩中常为基性斜长石。

在斜长石中，有时含有微量的稀有元素如 Li、Cs 等，也常含有少量的 Ti、Fe^{3+}、Fe^{2+}、Mn、Mg、Ba、Sr 等，通常都含有一定量的钾长石组分（少于 5%～10%），其含量随钙长石组分的减少、钠长石组分的增加而增加。

斜长石 $Na[AlSi_3O_8]$（钠长石）

［晶体参数和结构］ 三斜晶系，$a_0=8.149\sim8.177$Å、$b_0=12.877\sim12.880$Å、$c_0=7.106\sim14.169$Å，$\alpha=90°10'\sim93°22'$，$\beta=115°51'\sim116°18'$，$\gamma=90°17'\sim91°13'$。

［形态］ 对称型 C，晶体常呈板状、厚板状，在岩石中呈粒状，呈叶片状产出的钠长石称为叶钠长石，斜长石双晶极为发育，而且双晶类型较多，双晶律复杂。最常见的是聚片双晶，在正交偏光镜下较易观察，有时在手标本上也清晰可见其在(001)解理面的双晶纹。聚片双晶是鉴定斜长石的重要依据。

［物理性质］ 白色、灰白色，有时因含杂质而带其他色调，如红、黄、绿等色，条痕无色或白色，玻璃光泽，硬度 6～6.5，比密度 2.61～2.76，{001}和{010}解理完全，两组解理交角 86°30′左右。

［鉴定特征］ 以颜色、聚片双晶、解理、形态、硬度为其特征，与石英区别是斜长石具两组解理，表面易风化，硬度低；石英解理不发育，不易风化，表面干净，硬度较高。与正长石的区别见表 2.6.4。

表 2.6.4　正长石与斜长石的区别

	正　长　石	斜　长　石
晶形	短柱状	板状、厚板状
解理	两组解理夹角＝90°	两组解理夹角＝86°30′
颜色	肉红色，有时为灰白、棕黄色	白、灰白色，有时为浅红、浅绿
双晶	卡式双晶，晶面上无双晶纹	聚片双晶，断面可见双晶条纹
染色试验	将正长石小块，于 HF 酸中浸蚀 1～3 分钟，再在 60%亚硝酸钴钠中浸蚀 5～10 分钟，用水冲洗，显柠檬色	按同样方法，不染色，或呈浅灰色
产状	常与石英、黑云母伴生，产于浅色岩石中，如花岗岩、正长岩、伟晶岩等	常和普通辉石、橄榄石等伴生，产于深色岩石中，如辉长岩、橄榄岩等。

［用途］ 钠长石是陶瓷工业非常优良的熔剂原料，一般在 1100℃开始熔化，助熔作用很强，可明显降低坯釉的烧成温度，可提高釉的高温流动性，增加釉的白度、光泽度，提高坯体的机械强度，但钠长石熔融范围窄，对扩大产品烧成范围不利。

实例：烧成温度 1120～1150℃锆釉配方(%)：

钠长石 25、石英 12、高岭土 8、氧化锌 7、硅灰石 6、白云石 5、锆英砂 12、熔块 25。

6.9.2 霞石族

本族矿物系一般式为 $R[AlSiO_4]$的铝硅酸盐，其中 R 为 Li、K、Na 等，在高温时 Na[Al-

SiO_4]—K[$AlSiO_4$]，可形成连续类质同象系列。在化学成分上和长石相似，其不同点是本族矿物碱金属阳离子的含量比长石高，而 SiO_2 的含量则比长石低，他们出现在贫 SiO_2 的碱性岩中，而绝不与石英共生。本族结晶构造属六方晶系，主要矿物为霞石。

霞石 $KNa_3[AlSiO_4]_4$ 或简写的 Na[$AlSiO_4$]

［化学组成］ K_2O 5%～6%、Al_2O_3 33%、Na_2O 16%、SiO_2 44%，还含有少量的 Ca、Mg、Mn、Ti、Be 等。

［晶体参数与结构］ 六方晶系，a_0=10.01Å、c_0=8.41Å。

［形态］ 对称型 L^6，晶体呈六方柱状、短柱状或厚板状，集合体为致密块状。

［物理性质］ 白色、浅灰色，有的带浅黄、浅褐、浅红、浅绿等色调，玻璃光泽，断口现油脂光泽，故又称之为"脂光石"，条痕无色或白色无解理，有时具平行{0001}和{10$\bar{1}$0}的不完全解理，贝壳状断口，性脆，硬度 5～6，比密度 2.55～2.66。

［鉴定特征］ 霞石以光泽、颜色、产状和共生矿物为其特征，霞石与石英区别，霞石硬度较低，有时出现解理，表面因风化不干净，石英硬度较大，不易出现解理，表面保持干净，与钾钠长石的区别是钾钠长石解理完全，此外，与长石、石英不同点是，霞石直接溶于酸中能呈现出云霞状硅胶（故名霞石）。

［用途］ 主要用作陶瓷工业、玻璃工业的原料，在陶瓷工业中是优良的熔剂，有很强的助熔作用，可提高制品的机械强度，使坯体烧成时，不易沉塌，还可提高热膨胀系数，以防釉裂。

6.9.3 白榴石族

白榴石族矿物系一般式为 R[$AlSi_2O_6$]的铝硅酸盐，R 代表 K、Cs 和 Li，包括有白榴石和铯榴石等矿物。

白榴石 K[$AlSi_2O_6$]

［化学组成］ K_2O 21.58%、Al_2O_3 23.4%、SiO_2 55.62%，此外，含微量 Na、Ca、H_2O。

［晶体参数和结构］ 四方晶系，常呈假等轴晶系，a_0=13.04Å、c_0=13.85Å。温度在605℃以上时，转变为等轴晶系变体（β-白榴石），其 a_0=13.43。

［形态］ 对称型 L^4PC，通常所见的白榴石晶体仍保持着等轴晶系的外形，呈完善的四角三八面体，集合体为粒状。

［物理性质］ 无色、白色、灰色，有时带浅黄、浅红色调，玻璃光泽，断口油脂光泽，无解理，贝壳状断口，硬度 5.5～6，比密度 2.4～2.5。遇 HCl 能分解，并有粉末状的 SiO_2 析出。

［鉴定特征］ 以其完善的四角三八面体晶形，浅色及硬度大于小刀为其特征。

［用途］ 可作为陶瓷工业非常优良的熔剂原料，可降低坯釉的烧成温度，扩大产品的烧成范围，增加釉的白度、光泽度、热稳定性，还可提高产品的机械强度。

7 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物在自然界分布很广泛，已知 95 种左右，占地壳重量的 1.7%左右，不少碳酸盐矿物所组成的矿石和岩石是许多工业部门的原料和材料，具有重要的经济意义。

碳酸盐是金属元素阳离子和碳酸根$[CO_3]^{2-}$相化合而成的化合物，与碳酸根化合的金属元素阳离子有 20 余种，其中最主要的是 Ca^{2+}、Mg^{2+}，其次是 Na^+、Fe^{2+} 以及 Cu^{2+}、Zn^{2+}、Pb^{2+}、Mn^{2+}、TR^{3+}、Bi^{3+}。类质象代替广泛。

在碳酸盐的晶体结构里，络阴离子$[CO_3]^{2-}$呈三角形，阳离子 C 位于等边三角形中央，三个氧离子围绕它分布于角顶。C—O 间以共价键联结，它与具有较大离子半径或中等离子半径的二价阳离子等形成稳定的无水化合物。对于铜型离子如 Cu、Zn、Pb 等，可形成含附加阴离子$(OH)^-$或 Cl^- 的碳酸硅，如孔雀石 $Cu_2[CO_3](OH)_2$，角铅矿 $Pb_2[CO_3]Cl_2$。而离子半径较大的三价稀土元素，则往往形成含附加阴离子 F^- 的无水碳酸盐，如氟碳铈矿$(Ce,La)[CO_3]F$。

碳酸盐矿物中绝大多数属单斜晶系和斜方晶系，但有相当一部分属三方晶系和六方晶系，属于等轴晶系、四方晶系三斜晶系者极少。

碳酸盐矿物的物理性质一般是无色或白色，若含铜及其他色素离子则呈不同的颜色，硬度不大，一般在 3 左右，最大不超过 4.5，非金属光泽，具有较完全的解理。

所有的碳酸盐矿物与盐酸或硝酸易产生反应而放出二氧化碳，反应的难易是区分一些碳酸盐矿物的标志，某些碱金属的碳酸盐矿物可以溶解于水中。

碳酸盐矿物绝大部分是外生成因的，并以沉积作用为主，少数是内生成因的，主要产于中、低温热液矿床中。

碳酸盐矿物一般可以分为以下几类：

①方解石—文石族：方解石、菱镁矿、菱锌矿、菱铁矿、菱锰矿、白云石、文石、白铅矿、碳酸锶矿、碳酸钡矿。

②孔雀石族：孔雀石、蓝铜矿。

③氟碳钡铈矿族：氟碳钡铈矿。

④氟碳铈矿族。

本章中主要介绍与陶瓷工业紧密相连的方解石—文石族矿物。

本族矿物包括 Mg、Zn、Fe、Mn、Ca、Sr、Pb、Ba 等二价阳离子与碳酸根化合而成的无水碳酸盐。

方解石 $Ca[CO_3]$

[化学组成] CaO 56.03%、CO_2 43.97%，经常有 Mg、Fe、Mn 等类质同象代替，此外还可含有少量的 Pb、Zn、Ba、Sr、Co 等。

[晶体参数和结构] 三方晶系，菱面体晶胞 $a_0=6.41Å$，$\alpha=101°55'$。六方晶胞 $a_0=4.98Å$、$c=17.02Å$。

[形态] 对称型 $L^3 3L^2 3PC$，完好晶体常见，形态多样，多以菱面体为主。不同的聚形多

达600种，常见单形为六方柱、平行双面、菱面体。集合体形态种类较多，常呈晶簇、片状、块状、粒状、纤维状、钟乳状、结核状、土状等。

［物理性质］　质纯者无色、白色，有时因各种混入物而呈现不同的颜色，如含一定量Co或Mn呈现灰、黄、浅红色，含Cu现蓝绿色等，无色透明者称为冰洲石，玻璃光泽，硬度3，比密度2.6～2.8，{10 $\bar{1}$ 1}菱面体解理完全，遇冷稀HCl起泡，并发出嗞嗞声，放出CO_2。

热分析：方解石差热曲线如图2.7.1所示，加热到940℃有一吸热谷，方解石分解，放出CO_2。

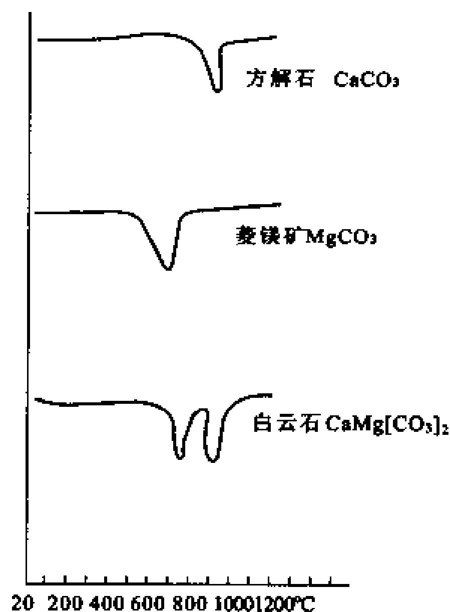


图2.7.1　碳酸盐矿物的差热曲线

［鉴定特征］　以其菱面体解理、硬度3、遇冷稀HCl起泡为特征，另外，灼烧后的方解石碎块置于石蕊试纸上呈碱性反应，还有钙的焰色反应(橘黄色)。

［用途］　石灰岩是建筑工业生产水泥、石灰及石材的主要原料，美丽的大理岩是上等建筑材料，在冶金工业上用作熔剂，化学工业上作为生产电石、合成纤维、合成橡胶的原料，无色透明的方解石—冰洲石是高级光学材料。

在陶瓷工业中，方解石是坯釉配方中常用的原料，主要起助熔作用，和坯料中粘土、石英在较低的温度下发生化学反应，降低烧成温度，缩短烧成时间，增加产品的透明度，促使坯釉结合牢固。方解石还是高温釉的主要原料，能增大釉的折光率，提高产品的光泽度。需要注意的是在釉料中，方解石用量过多(一般不超过18%，但在铬锡红色釉中可超过18%)会使釉面吸烟，导致变黄、发阴，影响白度，在透明釉中方解石用量过多，会导致釉面因析出钙长石晶体而失透。

实例一：烧成温度1100～1150℃的红棕色釉配方(%)：

釉料配方：熔块A 24.5、熔块B 10.5、长石28、石英10、方解石12、氧化锌4、滑石3、外加红棕色料(Zn-Cr-Fe)3～4。

熔块A块方：石英31、硼砂21、长石18、氧化锌5、方解石12、铅丹19。

熔块B配方：石英29、硼砂24、长石18、氧化锌9、锆英砂10、方解石12。

实例二：烧成温度1160℃的生铅釉配方(%)：

玻璃粉38、石灰石7、铅丹22、氧化锌6、高岭土10、石英14、氧化铝粉3。

实例三：烧成温度1240～1280℃的卫生瓷釉配方(%)：

钠长石33.5、石英17、高岭土12.5、石灰石16、氧化锌3、碳酸钡3、锆英石12、白云石3。

菱镁矿 $Mg[CO_3]$

［化学组成］　MgO 47.81%、CO_2 52.19%，菱镁矿$Mg[CO_3]$和菱铁矿$Fe[CO_3]$是一完全类质同象系列，所以，菱镁矿经常含有数量不等的铁，但在自然界，菱镁矿含Fe量一般不高(小于8%)，此外，有时含少量的Mn、Ca、Co、Ni等，致密块状的菱镁矿常含有$SiO_2 \cdot nH_2O$(蛋白石)、蛇纹石等杂质。

［晶体参数和结构］　三方晶系，菱面体晶胞$a_0 = 6.06Å$，$\alpha = 102°58'$，六方晶胞$a_0 = 4.58Å$、$c_0 = 14.92Å$。

［形态］ 晶体呈菱面体，或者是菱面体与六方柱、复三方偏三角面体组成的聚形，但晶体少见，主要单形有：菱面体、平行双面、六方柱、复三方偏三角面体，集合体呈粒状、致密块状，在风化壳中呈瓷状块体。

［物理性质］ 白色，含 Fe 者呈黄至褐色、棕色，含钴者呈淡红色，陶瓷状菱镁矿大都呈雪白色，玻璃光泽，硬度 4～4.5，比密度 2.9～3.1，性脆，{10$\bar{1}$1}菱面体解理完全。陶瓷状呈贝壳状断口，遇冷稀 HCl 作用不起气泡，加水后才剧烈产生气泡。

［鉴定特征］ 与方解石相似，区别是硬度稍高于方解石，与冷稀 HCl 反应不起泡，热分析的差热曲线(图 2.7.1)在 600℃左右具一吸热效应，系分解为 MgO 和 CO_2。

［用途］ 菱镁矿是重要的耐火材料，也用来提取金属镁。在陶瓷工业上，主要用于釉料中，使釉的膨胀系数降低，增加釉的白度、产品的化学稳定性和釉面硬度。

实例一：烧成温度 1320～1350℃的白釉配方(%)：

长石 36.7、石英 33.3、方解石 4、菱镁矿 5、氧化锌 5、界牌泥 6、高岭土 10。

实例二：烧成温度 1350℃绿青釉配方(%)：

色基配方：石英粉 39.5、氧化铬 25.7、氧化锌 5、氧化钴 5.9、碳酸镁 4.1、硼砂 19.89。

基釉配方：长石 40、石英 30、西山塘泥 20、镁质粘土 10。

色釉配方：基釉 90.91、色基 9.09。

白云石 $CaMg[CO_3]_2$

［化学组成］ CaO 30.41%、MgO 21.86%、CO_2 47.73%，组分中经常有 Fe、Mn 类质同象混入，$CaMg[CO_3]_2$—$CaFe[CO_3]_2$ 形成完全类质同象系列，还可有 Pb、Zn、Co 的类质同象混入物。

［晶体参数和结构］ 三方晶系，菱面体晶胞 $a_0=6.18$Å、$\alpha=102°50'$，六方晶胞 $a_0=4.84$Å、$c_0=15.95$Å。

［形态］ 对称型 L^3C，晶体常呈菱面体状，晶面常弯曲呈马鞍形，有时呈柱状或板状，常见单形有菱面体、平行双面、六方柱，复合体常呈粒状、致密块状，有时呈多孔状、肾状。

［物理性质］ 无色、白色，随着含 Fe 量增高为黄褐色、褐色。含 Mn 者可显浅红色、玻璃光泽，硬度 3.5～4。比密度 2.85，{10$\bar{1}$1}菱面体解理完全，解理面常弯曲。

热分析：差热曲线如图 2.7.1 所示，有两个吸热效应，第一个发生在 740℃左右，为白云石分解为游离的氧化镁和碳酸钙，第二个发生在 880℃以后，相当于碳酸钙的分解。

［鉴定特征］ 以其弯曲的晶面(马鞍形晶体)为特征。与方解石、菱镁矿的区别是白云石遇冷稀 HCl 反应微弱。

［用途］ 白云石用途广泛，主要作为冶炼生铁、钢铁等的熔剂原料及冶金工业方面的耐火材料、化工原料以及建筑石料。

在陶瓷工业中，是很好的熔剂原料，它可降低烧成温度，促进石英的熔解和莫来石的生成，扩大烧成范围，提高釉的光泽度和透明度，降低釉的热膨胀系数，白云石比方解石和滑石的性能好，不易发生析晶现象。

实例一：烧成温度 1250～1280℃的蓝色色釉配方(%)：

长石 46、石英 21、白云石 15、氧化锌 3、碱石 7、烧大同土 2、锆英石 3、蓝色色料 4。

实例二：烧成温度 1290℃的结晶釉配方(%)：

长石 40、玻璃粉 20、氧化锌 24、白云石 15、氧化钴 1。

注：冷却到 1180～1000℃必须 3 小时。

实例三：烧成温度 1160～1220℃无光釉配方(%)：

釉料配方：长石 36.9、霞石正长岩 18.3、高岭土 9.5、碳酸镁 2.4、白云石 9.3、碳酸钡 9.3、锆英粉 4.2、熔块 10.1。

熔块配方：长石 35、石英 16、高岭土 10、硼酸 25、方解石 14。

文石(亦称霰石)$CaCO_3$

[化学组成] 与方解石相同，常含混入 Sr 及 Pb。

[晶体参数和结构] 斜方晶系，$a_0=4.95Å$、$b_0=7.96Å$、$c_0=5.73Å$。

[形态] 对称型 $3L^2 3PC$，晶体常为柱状或尖锥形，常见单形为斜方柱、平行双面，集合体呈柱状、针状、纤维状、晶簇、珊瑚状、蛹状、豆状和球状等。

[物理性质] 白色、无色，有时呈浅绿色、灰色，玻璃光泽，硬度 3.5～4，贝壳状断口，比密度 2.9～3.0，无解理或有时见平行{010}不完全至中等解理。在冷稀 HCl 中溶解并放出 CO_2 气泡，加热时在 390～420℃有一个微弱的吸热效应，相当于文石转变为稳定的方解石，900℃以上吸热效应强烈，相当于方解石分解。

[鉴定特征] 文石与方解石相似，但文石不具菱面体解理，晶体呈柱状、尖锥状，比密度和硬度都稍大于方解石，在硝酸钴溶液中煮沸，方解石粉末只微带青色，文石则呈浓红色、紫色。

[用途] 陶瓷工业的用途同方解石。

8 氧化物和氢氧化物矿物

本大类包括一系列金属和非金属元素阳离子与阴离子 O^{2-} 或氢氧阴离子 $(OH)^-$ 相化合的化合物，这类矿物约有 300 种左右，占地壳总重量的 17%，其中石英分布最广，约占地壳重量的 12.6%，铁的氧化物和氢氧化物占 3%～4%，其次为 Al、Mn、Ti、Cr 的氧化物。

本大类中的很多矿物具有重要的国民经济意义，如 Fe、Cr、Mn、Al、Ti、Sn、Nb、Ta、U、Th、TR 等元素的氧化物为重要的矿石。压电石英、刚玉本身又是极重要的工业原料。

8.1 氧化物矿物

氧化物矿物已发现有 180 种左右，在地壳中分布广泛。

组成氧化物的主要阴离子是氧，与氧化合的元素约 40 种，主要是惰性气体型离子和靠近惰性气体离子一边的过渡型离子，而铜型离子极少见，如主要为 Si、Al、Fe、Mn、Ti、Cr、Nb、Ta、Sn、U 等，其次为 Cu、Pb、Sb、Bi 等。在少数氧化物中还含有水分子。

氧化物中类质同象替代广泛发育，较常见的类质同象元素有 Fe、Mn、Mg、Al、Cr、Nb、Ta 等。

变价元素（如 Fe、Mn、V 等）在氧化物中一般以高价状态出现，低价状态不稳定。这是因为大多数氧化物是在氧化还原电位较高的条件下形成的。有时，同种元素的高低价状态亦常并存，如磁铁矿 $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$。

氧化物的晶体构造基本决定于氧离子，氧离子半径一般为 1.32Å，远大于阳离子半径，通常氧离子呈立方或六方最紧密堆积，阳离子充填其八面体、四面体的空隙中，阳离子的配位数主要是 4 和 6（也有的是 8 和 12）。

化学键以离子键为主（二价金属的氧化物），有的向共价键过渡而接近共价键（三价和四价金属氧化物，如刚玉、石英、金红石等），亦有的向金属键过渡（如磁铁矿、锰矿等），分子键只见于少数氧化物中（如锑华）。

氧化物常呈完好的晶形，亦常见致密块状和粒状、疏松土状或粉末状集合体，有时呈隐晶质或胶体集合体。

多数矿物由于含 Fe、Mn、Cr 过渡型色素离子，所以颜色较深，半透明至不透明，玻璃光泽至半金属光泽，而惰性气体型离子（Mg^{2+}、Al^{3+}、Si^{4+} 等）的氧化物常为浅色或无色，半透明至透明，以玻璃光泽为主。

氧化物硬度较大（一般大于 5.5，最高达 9），无解理或解理不完全，熔点高，溶解度低，在表生条件下化学性质、物理性质稳定，比密度因化学成分和集合方式而异（Sn、Nb、Ta、U 和氧化物之比密度特大）。此外，含铁矿物具有强弱不等的磁性，含放射性元素的矿物具有放射性，并且往往由于放射性元素的蜕变而使矿物产生非晶质化。

氧化物可形成于内生、外生和变质作用过程中，但成分不同的矿物形成条件亦不同，如变价元素的低价氧化物（Fe^{2+}、Cr^{3+}、Mr^{2+} 等）多形成于内生作用，而高价氧化物（Mn^{4+}、W^{6+}、

Sb^{5+}等)则多为外生作用产物,不变价元素的氧化物有多种成因(在岩浆、伟晶、热液或变质作用下都可形成),又因氧化物化学性质稳定,还可形成砂矿。

氧化物可分为简单氧化物和复杂氧化物,本教材只介绍有关内容。

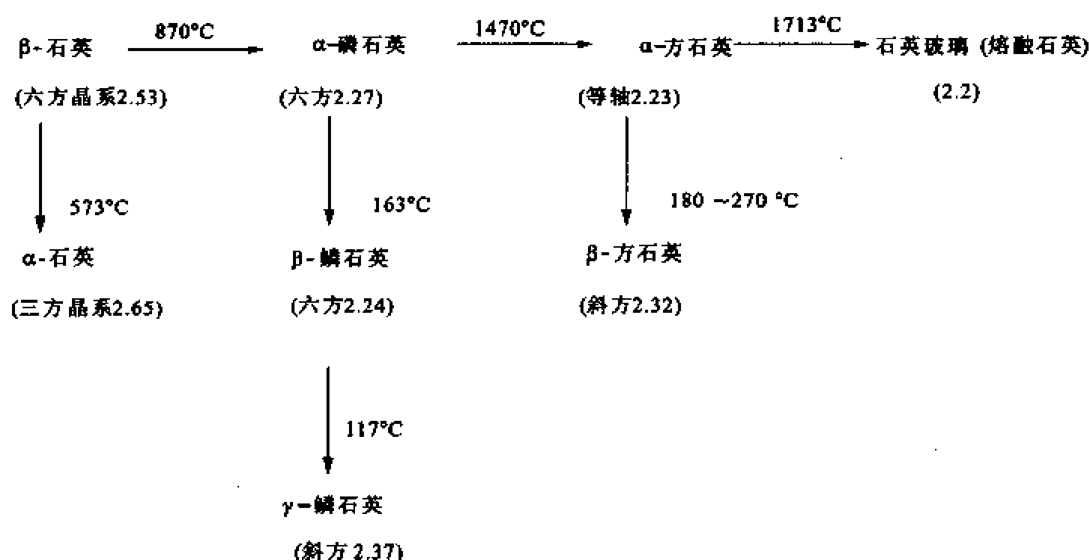
8.1.1 简单氧化物

是由一种金属阳离子与氧化合而成的化合物,由于阳离子价次的不同,可以组成 A_2X、AX、A_2X_3、AX_2 型(X 表示氧离子,A 表示阳离子)的化合物,这类矿物的晶体结构比较简单,只有石英族矿物较为复杂。

1. 石英族

石英族矿物成分简单,为 SiO_2,类质同象混入物很少,常有机械混入物或包裹体。

本族矿物包括含 SiO_2 成分的一系列同质多象变体,它们之间的形成温度以及所属晶系和比密度的大小如下所列:



实验证明:β-石英转变成α-磷石英是比较困难的,实际上β-石英首先转变为β-方石英,再由β-方石英转变为β-磷石英。但在有矿化剂(FeO、CaO、MgO 等)参与下,β-石英只经生成亚稳定方石英后可直接生成β-磷石英。

如上所列,横向转变要慢得多,这是因为转变前后变体的结构和性质大不相同,转变时,整个分子要被打乱,晶格需重新组合,因此需要较长的时间和较大的能量,而纵向转变要快得多,因为其转变前后结构和性质相似,只是结构中硅氧四面体只有稍微移动和旋转(即键角发生微小变化)。

自然界中,分布最广的是低温石英,即α-石英,是多种火成岩、变质岩以及沉积岩的重要矿物成分。β-石英是 SiO_2 在573℃以上的一种同质多象变体,见于酸性喷出岩或浅成岩中,由于α-石英和β-石英之间的转变是可逆的,因而β-石英在常温条件下转变为α-石英时,仍保持着β-石英的六方双锥的外形。鳞石英和方石英则很少见,仅发现于高温低压下形成的酸性喷出岩中及多存在于硅酸盐制品——硅质耐火材料中。另外,分布较广的是隐晶质石英——玉髓(石髓)、燧石、玛瑙以及含水的胶体矿物——蛋白石。

α-石英 SiO_2

[化学组成] 简称石英，成分较纯，SiO_2 通常接近于 100%，Si 46.7%、O 53.3%，仅含有少量的气态、液态和固态物质的机械混人物，而构成不同颜色的亚种。

[晶体参数和结构] 三方晶系，$a_0=4.913$Å，$c_0=5.405$Å，有左晶、右晶之分，视螺线之左旋或右旋而定。

[形态] 对称型 $L^3 3L^2$，常发育成好的柱状晶体，通常由六方柱 $m\{1010\}$ 和菱面体 $r\{10\bar{1}1\}$，$z\{01\bar{1}1\}$ 等所组成的聚形，有时还出现三方双锥 $s\{11\bar{2}1\}$ 或 $\{2\bar{1}1\bar{1}\}$ 和三方偏方面体 $x\{51\bar{6}1\}$ 或 $\{6\bar{1}\bar{5}1\}$。菱面体一般 r 比 z 发育，且分布普遍，柱面有横纹(图 2.8.1)。

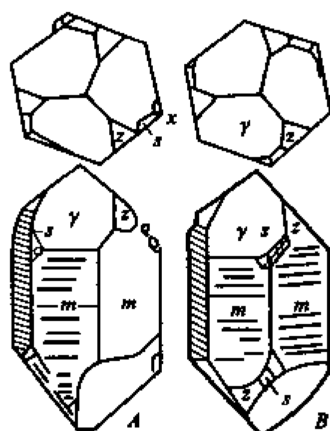


图 2.8.1 α-石英的左晶(A)和右晶(B)
$m\{10\bar{1}0\}r\{10\bar{1}1\}z\{01\bar{1}1\}s\{11\bar{2}1\}\{2\bar{1}\bar{1}1\}x\{51\bar{6}1\}\{6\bar{1}\bar{5}1\}$

α-石英有左晶和右晶之分，区分它们的主要标志是 α 面和 s 面的位置：x 面位于 m 面之左上角为左形，位于右上角为右形；s 面上的斜纹上端指向左上方者为左形，指向右上方者为右形(图 2.8.1)。

α-石英随着形成时的温度和过饱和程度的不同晶体习性也会发生变化。

α-石英集合体形态有：显晶质的呈簇状、梳状、粒状，隐晶质的呈肾状、钟乳状(石髓)、结核状(燧石)、晶腺(玛瑙)、致密块状(碧玉)。

双晶十分普遍，常见的双晶有巴西双晶、道芬双晶、日本双晶，直接影响石英的用途，降低工业价值。

[物理性质] α-石英的颜色因不同的机械混人物而不同，一般多为无色、乳白色和灰色，玻璃光泽，断口油脂光泽，硬度 7，基本无解理，贝壳状断口，比密度 2.65，具压电性。

α-石英除氢氟酸外，不溶于任何酸，在熔融 Na_2CO_3 中可溶。

α-石英可根据形态和特性的差异，有以下若干变种：

水晶：无色透明的晶体。

紫水晶：紫色、透明、半透明晶体。加热时，有时能使紫色消褪，呈色原因一般认为含有 Mn、Fe^{3+}、Ti^{4+} 所致。

蔷薇水晶：浅玫瑰色的致密块体，在空气中加热至 575℃，红色即消褪。在日光下长期暴露红色渐变淡，呈色因含 Ti、Mn 所致。

烟水晶：烟黄色或烟褐色，透明，呈色可能由于有流态气体所致，也有认为含有自由 Si 所致，加热至 225℃以上时开始褪色。

墨晶：墨黑色，透明，呈色是由于含有机质的缘故。

乳石英：乳白色、半透明，是含有细小分散的气态或液态包裹体所致。

石髓(玉髓)：半透明，具蜡状光泽的隐晶质石英常呈钟乳状、肾状，一般为白色。

玛瑙：具有不同颜色的带状构造的石髓称玛瑙。

[鉴定特征] 以晶形、无解理、贝壳状断口、硬度高、断口油脂光泽为其特征。与方解石的区别是方解石硬度低、遇酸起泡。与长石区别是长石具解理。

[用途] 在陶瓷工业中，是最重要的瘠性原料，起骨架作用。其他用途还相当广泛，压电

石英用于国防、电子工业，水晶用于制造透镜、棱镜等光学仪器，玛瑙可作研磨材料、精密仪器轴承，还可作工艺雕刻品的材料等等。

实例：烧成温度800～830℃的铜绿釉配方(%)：

釉料配方：熔块A 76.3、熔块B 8.6、熔块C 10.3、高岭土3、碳酸铜1.8。

熔块A配方：铅白81.1、石英18.9。

熔块B配方：碳酸钠22.8、氧化铅40.0、石英37.2。

熔块C配方：硼砂68.4、石灰石8.4、石英23.2。

β-石英 SiO_2

［化学组成］ 同α-石英。

［晶体参数和结构］ 六方晶系，$a_0=5.02Å$，$c_0=5.48Å$，晶体结构中硅氧四面体的连接方式系按六次螺旋轴排列。

［形态］ 对称型$L^6 6L_2$，晶体常呈完好的六方双锥，主要单形为六方双锥，六方柱，柱面m不发育或不存在，晶体较小，常呈分散粒状。

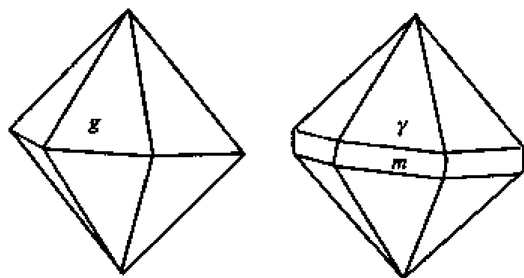


图2.8.2 β-石英晶体

［物理性质］ 在一个大气压下，β-石英的稳定相在573～870℃，比密度为2.53，常温下均已转变为α-石英，此时其物理性质与α-石英相同。

［鉴定特征］ 以其六方双锥的晶形与α-石英相区别。

α-鳞石英 SiO_2

［化学组成］ 同α-石英，常含Na和Al。

［晶体参数和结构］ 六方晶系，$a_0=5.04Å$、$c_0=8.24Å$。晶体结构中，六方硅氧四面体呈六方环状连接，其中相间的3个顶端向上，而另外相间的3个顶端则向下，再分别与上、下环中四面体的顶端连接，β-鳞石英在冷却过程中，至163℃以下转变为β-鳞石英，117℃以下转变为γ-鳞石英(斜方晶系)。

［形态］ 对称型$L^6 6L^2 7PC$，单晶体呈六方板状，主要单形有平行双面、六方柱、六方双锥，集合体为扁形或球形。

［物理性质］ 形成温度为870～1470℃，比密度为2.27，无色或白色，玻璃光泽。

［鉴定特征］ 以板状晶形为其特征，进一步的鉴定需要光学测定。

α-方石英 SiO_2

［化学组成］ 同α-石英。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=7.16Å$，β-方石英形成于高温，1470～1713℃之间，在冷却过程中至180～270℃以下时，转变为亚稳状态的α-方石英(低温方石英)。

［形态］ 对称型$3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶形一般呈细小八面体，少数为立方体，也有菱形十二面体、三角三八面体，八面体一般呈不同程度的骸晶，依(111)呈尖晶石律双晶。集合体呈具有纤维放射状的球形。

［物理性质］ 无色、乳白色、黄色、玻璃光泽、硬度6～7，比密度2.23，熔点1713℃。

［鉴定特征］ 以其八面体晶形、骸晶的特征，进一步鉴定需用光学测定。

蛋白石 $SiO_2 \cdot nH_2O$

［化学组成］ 为非晶质SiO_2的胶体矿物，往往由富水的二氧化硅凝胶脱水而成。含水量

不一定，常为 1%～5%，少数可达 34%，成分中有时含 MgO、CaO、Al_2O_3、Fe_2O_3 等杂质，加热 100～250℃时可失去大部分水。有的资料说明蛋白石系由极微小的低温方英石晶粒所组成。

[形态] 无一定的外形，集合体通常呈致密块状、钟乳状、结核状、皮壳状。轻质多孔者称硅藻土。

[物理性质] 质纯者为无色或白色，如鸡蛋白而得名，可因含各种混入物而呈现不同颜色，玻璃光泽(多孔状者则呈蜡状光泽或无光泽)，半透明者呈乳白色，硬度 5～5.5，比密度 1.9～2.9 之间，断口贝壳状。比密度大小视含水量及吸附物质而定。

根据物理性质，蛋白石分为下列亚种：

贵蛋白石：半透明带乳光变形。

水蛋白石：质轻、多孔，在水中透明，干燥时浊色。

玻璃蛋白石：呈钟乳状。

[鉴定特征] 蛋白光泽和变彩、硬度低、含水。

[用途] 贵蛋白石可作装饰品、工艺品，硅藻土可作陶瓷原料，以及研磨、建筑、绝缘和过滤材料。陶瓷工业中，蛋白石可作为瘠性原料，起骨架作用。

2. 刚玉族

本族矿物属于 A_2X_3 型，主要矿物有刚玉 α-Al_2O_3 和赤铁矿 α-Fe_2O_3。

刚玉 α-Al_2O_3

Al_2O_3 具有多种变体，在实验室里加热氧化铝水化物和铝盐的过程中能获得它们，但在 1000℃以上都转变为稳定的 α-Al_2O_3。稳定的天然 α-Al_2O_3 变体，称为刚玉。

[化学组成] Al 53.2%、O 46.8%，有时含有微量的 Fe、Ti、Cr、Mn 等类质同象混入物。

[晶体参数和结构] 三方晶系，a_0=4.75Å、c_0=12.97Å。

[形态] 对称型 $L^3 3L^2 3PC$，晶形似腰鼓状或桶状、柱状，少数呈板状、叶片状。主要单形有六方柱、六方双锥、平行双面、菱面体。集合体呈粒状和致密块状。

[物理性质] 常呈蓝灰色、黄灰色，由于含杂质不同可呈现各种颜色，根据颜色的不同刚玉又可有如下的命名：白宝石(无色的刚玉)，红宝石(红色含 Cr)，蓝宝石(蓝色含 Ti 和 Fe)，绿宝石(绿色含 Co、Ni、V)，铁刚玉(黑色含 Fe)，黄宝石(黄色含 Ni)。这些亚种，均可作为名贵的宝石。玻璃光泽至金刚光泽，硬度 9，比密度 3.95～4.10(随 Cr_2O_3 含量增加而增大)，无解理，但经常有由聚片双晶或氢氧化物夹层造成沿板面{0001}和菱面体{$10\bar{1}1$}的裂开。

[鉴定特征] 以桶状、腰鼓状、晶面条纹、硬度为其特征。与蓝晶石区别是刚玉硬度大、无解理，蓝晶石硬度小，显异向性，具{100}完全解理。

[用途] 由于硬度高，主要用作研磨材料和精密仪器的轴承。彩色透明的可作宝石，红宝石又是目前主要的激光材料。在陶瓷工业中可作高铝质瓷的高铝原料和釉用原料。

实例：烧成温度 1100～1150℃颜色釉的基础釉的配方(%)：

熔块 30、长石 24、石英 18、方解石 5、氧化铝 4、锆英石 6、黑泥 6、滑石 6。

熔块配方：长石 16、石英 34、氧化锌 3、硼砂 16、硝酸钾 6、石灰石 9、界牌土 10、碳酸钠 6。

在上述基础釉中，分别加入茶赤 2%、镨黄 1.2%、红棕 6%、橘黄 3%、孔雀蓝 1%、浓青 2%、深银灰 3%、深黑 0.8%，可以获得呈色不同的颜色面釉。

赤铁矿 Fe_2O_3

自然界 Fe_2O_3 的同质多象变体有两种：即 α-Fe_2O_3 与 γ-Fe_2O_3。前者为三方晶系，在自然

界稳定，称赤铁矿，后者为等轴晶系，在自然界不如 α-Fe_2O_3 稳定，处于亚稳定状态，称为磁赤铁矿。

[化学组成] Fe 69.94%、O 30.06%，常含类质同象混入物 Ti、Mg 及微量水，隐晶质致密块体内常含 Al_2O_3、SiO_2 等机械混入物。

[晶体参数和结构] 三方晶系，a_0=5.039Å，c_0=13.76Å。

[形态] 对称型 $L^3 3L^2 3PC$，晶形呈片状、板状、菱面体状，常见单形有平行双面、菱面体、六方双锥，完好的单晶体少见，常见集合体形态为致密块状、鲕状、豆状、肾状、粉末状、鳞片状、片状。

[物理性质] 晶体呈钢灰或铁黑色，隐晶或粉末状者为赤红色，条痕樱红色，金属光泽至半金属光泽，硬度 5.5～6，隐晶或粉末状者硬度较小，性脆，无解理，比密度 5.0～5.3，无磁性。

赤铁矿根据形态特征又可有如下命名：镜铁矿（片状，具金属光泽），云母赤铁矿（细小鳞片状或贝壳状的集合体），鲕状赤铁矿（呈鲕状，大者为肾状）。

[鉴定特征] 以条痕、形态、无磁性为特征，并与类似它的矿物——磁铁矿、铬铁矿、褐铁矿、钛铁矿相区别。

[用途] 重要的铁矿石之一，用以冶炼生铁和钢，具有重大的国民经济意义。在陶瓷工业坯釉配方原料中含 Fe_2O_3 则是有害物质，但赤铁矿可作制作陶瓷色料如红棕色料的原料。

8.1.2 复杂氧化物

复杂氧化物是由两种或两种以上的金属阳离子与氧化合而成的化合物，可以组成 ABX_3、AB_2X_4、ABX_6 型的化合物，这类矿物在成分和结构上均比较复杂。

尖晶石族

本族矿物属 AB_2X_4 型，A 代表二价的镁、铁、锌、锰，B 代表三价的铁、铝、铬，在这些矿物之间，广泛发育着安全和不完全的类质同象。

在尖晶石矿物中，根据其成分中三价离子的不同，分为下列三个系列：

①尖晶石系列（铝-尖晶石），三价阳离子为 Al^{3+}；

②磁铁矿系列（铁-尖晶石），三价阳离子为 Fe^{3+}；

③铬铁矿系列（铬-尖晶石），三价阳离子为 Cr^{3+}。

上述三个系列之间存在着不同的类质同象关系，铬铁矿系列与磁铁矿系列之间为连续的类质同象，铬铁矿系列与尖晶石系列之间为不连续的类质同象。尖晶石系列与磁铁矿系列之间不发生类质同象。

由于本族矿物在结构上所存在的共同特点，它们一般为等轴晶系，常具有八面体、菱形十二面体的三向等长晶形，在物理性质上为硬度高、无解理等特征，又由于本族矿物类质同象极为复杂，使其在晶胞参数及某些物理性质上出现明显的差异。

以下分别对三个系列的重点矿物即尖晶石、磁铁矿、铬铁矿进行叙述。

尖晶石 $MgAl_2O_4$

[化学组成] MgO 28.2%、Al_2O_3 71.8%，常含 Fe、Cr、Zn、Mn 等类质同象混入物。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，a_0=8.103Å。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，单晶体常呈八面体，有时与菱形十二面体和立方体组成聚形。

[物理性质] 无色者少见，常呈红色(含 Cr)、蓝色(含 Fe^{2+})、草绿色(含 Fe^{3+})、褐黑色(含 Fe^{2+}、Fe^{3+}、Cr^{3+})，玻璃光泽，硬度 8，无解理，偶有平行(111)裂理，比密度 3.55，熔点高至 2150℃。

[鉴定特征] 以晶形、双晶、硬度大为其特征。同时吹管火焰不熔。与相似矿物的区别，锆英石比密度较大，刚玉有较之更大的硬度，石榴子石硬度比尖晶石小，吹管火焰可熔。

[用途] 透明色艳者可作宝石，在陶瓷工业原料上可作为制造色料的原料。

磁铁矿 $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ (Fe_3O_4)

[化学组成] FeO 31.03%、Fe_2O_3 68.97%，Fe 的含量为 72.4%。常含 Ti、V、Cr、Ni 等类质同象混人物。含 Ti 者称钛磁铁矿，含 V 者称钒磁铁矿，含 Ti、V 者称钒钛磁铁矿，含 Cr 者，称铬磁铁矿。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，$a_0=8.374$Å。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶体呈八面体，少数为菱形十二面体，集合体为致密块状。

[物理性质] 铁黑色，条痕黑色，半金属光泽，不透明，硬度 5.5～6.5，无解理，有时具(111)裂理，性脆，比密度 5.5～6，具强磁性。

[鉴定特征] 以八面体晶形、铁黑色、条痕黑色、强磁性为其特征，并依此可与赤铁矿、铬铁矿相区别。

[用途] 为炼铁重要矿石，含钒钛或稀土元素时，可综合开采利用。在陶瓷工业的坯釉配方中含有磁铁矿为有害物质，要利用除铁器进行除铁。但可作制造黑色、黄褐色色料的原料。

铬铁矿 $FeCr_2O_4$

[化学组成] 成分复杂，存在着广泛的类质同象置换，Cr^{3+} 常被 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 代替，Fe^{2+} 常被 Mn^{2+} 代替，各组分含量变化很大，其中 Cr_2O_3 18%～62%，Fe_2O_3 2%～30%，Al_2O_3 0～33%，FeO 0～18%，MgO 6%～16%，一般所称的铬铁矿为(Mg、Fe)Cr_2O_4，此外，常有数量不多的 Mn、Ti、V 和 Zn 的类质同象混人物。

[晶体常数和结构] 等轴晶系，a_0 为 8.305～8.344Å。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$。晶形为细小八面体，但少见。一般多呈粒状或致密状集合体。

[物理性质] 黑色，条痕褐色，半金属光泽，不透明，硬度 5.5～6.5，无解理，性脆，比密度 4.3～4.8，具弱磁性，含铁量高者磁性较强。

[用途] 是提炼铬的唯一矿物原料，富含铁的劣质矿石可供制高级耐火材料，在陶瓷工业中属有害物质。

8.2 氢氧化物矿物

氢氧化物已发现有 80 多种矿物，主要产于地壳表层的氧化带和水化作用带，大多数为表生作用的产物。

氢氧化物的阴离子主要为 OH^- 和 O^{2-}，阳离子主要为 Mg^{2-}、Fe^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}、Mn^{4-}，此外，还有中性的水分子。氢氧化物的类质同象代替有限，远不如氧化物广泛，但是，由于吸附作用所引起化学组成的变化却较复杂。这类化合物是提取镁、铝、钛、锰的矿物原料。

氢氧化物的晶体大多属层状，在层内为离子键，层与层之间为分子键，只有少数矿物如水锰矿、水铝石等具链状构造。

氢氧化物晶体呈片状、板状或鳞片状，具完全底面解理，硬度较氧化物低，颜色决定于组分中阳离子类型，如为惰性气体型离子（Mg、Al 等），则颜色较浅，为无色或灰白色。含过渡性离子（Fe^{2+}、Fe^{3+}、Mn^{2+}等），颜色较深，常呈褐或黑褐色。具链状构造的氢氧化物往往呈柱状或针状晶形，硬度也大大提高。

氢氧化物的主要成因为风化型和化学沉积型，主要集中于岩石风化壳部分，分布于金属矿床的氧化带或湖泊、水盆地中。

8.2.1 水镁石族

本族化合物属 $R(OH)_2$ 型。R 代表二价镁、铁、锰、钙等。

水镁石（氢氧镁石）$Mg(OH)_2$

［化学组成］ MgO 69.12%、H_2O 30.88%，有时含 FeO 达 10%、MnO 达 20%、ZnO 达 4%，这些氧化物组分的阳离子系类质同象置换 MgO，从而形成变种：锰水镁石、铁水镁石、锌水镁石。

［晶体参数和结构］ 三方晶形，$a_0=3.13$Å，$c_0=4.74$Å。

［形态］ 对称型 $L^3 3L^2 3PC$，单晶体呈板状，常见单形有平行双面、六方柱、菱面体等。集合体常见者为片状集合体，呈纤维状集合体者称纤维水镁石。

［物理性质］ 白至淡绿色，含有锰及铁者呈红褐色，玻璃光泽，解理面为珍珠光泽，解理平行{0001}极完全，薄片具挠性，硬度 2.5，比密度 2.3～2.6，具热电性。

［鉴定特征］ 以其形态、低硬度和{0001}极完全解理为特征，根据其易溶于酸，不起泡与滑石、叶蜡石等相区别。

［用途］ 陶瓷工业可作为镁质瓷的原料。

8.2.2 三水铝石——水软铝石族

本族矿物包括三种铝的氢氧化物，即 $R(OH)_3$ 型的三水铝石和 RO(OH)型的一水软铝石和一水硬铝石。通常所谓的铝土矿，实际上并不是一个矿物种，而是以三水铝石或一水硬铝石为主要组分，并包括一水软铝石、高岭石、蛋白石、赤铁矿等多种矿物的矿石名称。

三水铝石（水铝氧石）$Al(OH)_3$

［化学组成］ Al_2O_3 65.4%、H_2O 34.6%，常有少量的 Fe 和 Ga 置换 Al。

［晶体参数和结构］ 单斜晶系，$a_0=8.64$Å、$b_0=5.07$Å、$c_0=9.72$Å，$\beta=94°34'$。

［形态］ 对称型 L^2PC，单晶体通常呈假六方形，板状或鳞片状。常见单形为平行双面，斜方柱集合体为结核状、豆状、钟乳状等，主要呈胶态非晶质或隐晶质。

［物理性质］ 白色或由于杂质带有不同的浅灰、浅绿、浅红色调，玻璃光泽，解理面呈珍珠光泽，解理平行{001}极完全，硬度 2.5～3.5，比密度 2.35，具土臭味。

［鉴定特征］ 以极完全解理、低硬度、小比密度、玻璃光泽为其特征。对结核状集合体和隐晶质块体，可加硝酸钴溶液置氧化焰中强热，如样晶变为蓝色，证明其含铝。

［用途］ 提炼铝的最主要矿物原料，也是制造人工磨料、耐火材料和高铝水泥的原料，若含镓时，可综合利用。在陶瓷工业中是高铝质瓷的原料，也可少量地用作釉用原料。

实例：烧成温度1020～1080℃乳白釉熔块配方(%)：

长石35、石英25、高岭土5、$Al(OH)_3$ 5、$BaCO_3$ 3、硼砂13、ZnO 8、石灰石6。

一水软铝石(勃姆石、水铝石、薄水铝矿)AlOOH

[化学组成] Al_2O_3 85%、H_2O 15%，有少量Fe和Ga代替Al。

[晶体参数和结构] 斜方晶系，$a_0=3.69Å$、$b_0=12.24Å$、$c_0=2.86Å$，与一水硬铝石为同质二象。

[形态] 对称型$3L^23PC$，晶体呈现极细小的片状或扁豆状，但少见，常见单形有平行双面、斜方双锥，一般呈隐晶质块体或胶态分布于铝土矿中。

[物理性质] 白色或微黄色，玻璃光泽，解理平行{010}完全，硬度3.5，比密度3.01～3.06。

[鉴定特征] 同三水铝石。

[用途] 同三水铝石。

一水硬铝石(水铝石)AlOOH

[化学组成] Al_2O_3 85%、H_2O 15%，常含Fe、Mn、Cr等混入物。

[晶体参数和结构] 斜方晶系，$a_0=4.41Å$、$b_0=9.40Å$、$c_0=2.84Å$。

[形态] 对称型$3L^23PC$，晶体呈板状、柱状或针状，常见单形为斜方柱、平行双面、核状集合体。

[物理性质] 白色、灰色、黄褐、灰绿色或由于含Mn^{3+}、Fe^{3+}而变成褐至红色，条痕白色，玻璃光泽，解理面珍珠光泽，硬度6～7，性极脆，解理平行{010}完全，贝壳状断口，比密度3.2～3.5。

[鉴定特征] 以其较高的硬度与三水铝石、一水软铝石相区别。

[用途] 同三水铝石。

铝土矿(铝矾土)$Al_2O_3 \cdot nH_2O$

[化学组成] 实际上是以各种铝的氢氧化物(一水软铝石、一水硬铝石、三水铝石)为主，包括含水氧化硅等组成的胶态混合物，并为含水氧化铁(褐铁矿)、含水铝的硅酸盐(高岭石)、赤铁矿、蛋白石等矿物所胶结，统称铝土矿。

铝土矿中常含分散元素镓(Ga)及Nb、Ta、Ti、Zr，含量高时可考虑综合利用，当铝土矿中$Al_2O_3>40\%$，$Al_2O_3:SiO_2>2:1$时才能为工业所利用，铝土矿根据其中矿物成分的不同，可分为"一水型铝土矿"、"三水型铝土矿"。

[形态] 大多数为胶态，常呈豆状、鲕状、致密块状。

[物理性质] 颜色变化很大，一般为深灰白色至青灰色，但由于含杂质不同，亦可呈灰褐色至灰黑色，有时因含铁质而有红褐色斑点。土状光泽，断口贝壳状或平坦状。比密度2.5～3.5，有土臭味。硬度不一，以三水铝石为主时，硬度较低，以一水硬铝石为主时，硬度较大，一般为3～4。

[鉴定特征] 以豆状构造、光泽为其特征。与石灰岩、碧玉相似，其区别是将一小块铝土矿在氧化焰中燃烧，加一滴$Co(NO_3)_2$溶液，再烧冷却后，有蓝色Al的反应，此外加HCl不起泡。与页岩的区别是铝土矿无页理，硬度较大。与粘土的区别是铝土矿无可塑性。

[用途] 陶瓷工业中可作高铝瓷原料，也可用于建筑陶瓷坯釉的原料，近年来得到较广泛的使用。

8.2.3 纤铁矿-针铁矿族

本族矿物包括铁的氢氧化物和含水氧化物。

褐铁矿 $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$

[化学组成] 褐铁矿实际上并不是一个矿物种，而是以针铁矿或水针铁矿为主要组分，并包括纤铁矿、含水氧化硅、泥质等组成的矿石名称。化学成分变化大，含水量变化也大，一般含Fe量30%～63%。

[形态] 通常呈针乳状、葡萄状、蜂窝状、迭瓦状、土状、致密状和结核状等胶体形态产出，有时呈黄铁矿的假象。

[物理性质] 黄褐、暗褐至褐黑色，条痕黄褐色，光泽一般暗淡，硬度1～4，比密度3.3～4。

[鉴定特征] 以形态、颜色、条痕为特征，并可与赤铁矿、磁铁矿区别。

[用途] 含铁量达35%～40%，即可作为炼铁原料。陶瓷工业中属有害物质。

9 其他各类有关矿物

9.1 硫化物及其类似化合物矿物

硫化物及其类似化合物包括一系列金属元素与硫、硒、碲、砷等相化合的化合物。矿物种数约350种，占矿物总数1.5%，占地壳总重量0.25%，其中硫化物的矿物总数占2/3，重量以铁的硫化物占大部分，其余元素的硫化物及其类似化合物只占地壳总量的0.001%，显然它们的分布量很少，但可以富集成具有工业意义的有色金属和稀有分散元素矿床。

组成成分：与硫组成化合物的最主要元素为铁、钴、镍、钼、铜、铅、锌、银、汞、镉、铋、锑、砷等，而镓、铟、铼等元素主要以类质同象混入物形式存在于其他硫化物中。与硒组成化合的元素为铜、银、铅、汞、铋、钴、镍等。此外，硒本身往往成为硫的类质同象混入物出现在硫化物中。与碲组成化合物的元素主要有铜、银、金、铅、镍、铋、铂、钯等。与砷组成化合物的元素有铁、钴、镍、铂。

上面所述阳离子元素主要为铜型离子和接近铜型离子的过渡型离子，它们与硫、硒、碲、砷等具有显著的亲和力，所形成的化合物几乎都不溶于水。

硫等阴离子部分，往往具有不同的价态。

本类矿物类质同象现象非常广泛，一些稀有分散元素如镓等，多不呈独立矿物，而呈类质同象存在于矿物中，因此，研究硫化物矿物的类质同象，对综合利用稀有分散元素具有重要意义。

晶体构造：硫化物矿物的晶体构造属离子晶体。硫的化合物应属于离子化合物，但因阳离子半径较小，电荷较高，极化能力较强，而阴离子半径大，易被极化。这样阴、阳离子之间很容易引起极化现象。极化的结果，使硫化物的化学键具过渡性，大部分离子键趋向于金属键，一部分则趋向于共价键。

物理性质：是由其成分结构及其特征所决定的。趋向金属键过渡的硫化物，具金属光泽，金属色，不透明，导电。趋向共价键过渡的硫化物，具金刚光泽，半透明，不导电。

此类化合物硬度较低，一般在2～4之间，其中是层状结构的硫化物，其硬度低到1～2之间，而阴离子为硫$[S_2]^{2-}$，对砷$[AS_2]^{2-}$等则硬度可增高到5～6左右。比密度一般在4以上。

成因及产状：硫化物矿物在成因上绝大部分呈热液型和接触交代型，部分为岩浆型，外生作用形成的硫化物，多为还原条件下的产物。

原生金属硫化物，在地表条件下，易被氧化分解，形成氧化物、硫酸盐、碳酸盐等，并往往在地下水附近构成硫化物矿床次生富集带。

下面只介绍几种主要的硫化物矿物。

方铅矿 PbS

[化学组成] Pb 86.6%、S 13.4%，混入物中以Ag为最常见，其次为Cu、Zn。S有时被Se代替，可以形成PbS-PbSe完全类质同象系列。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=5.93\text{Å}$。

［形态］ 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶体常呈立方体晶形，有时以八面体，与立方体聚形出现，集合体常呈柱状、致密块状。

［物理性质］ 铅灰色，条痕灰黑色，金属光泽，有平行{100}三组完全解理，解理面互相垂直。硬度 2～3，比密度 7.4～7.6，具弱导电性和良检波性。

［鉴定特征］ 铅灰色、灰黑色条痕、金属光泽、解理、硬度小、比密度大为特征。另外，矿粉加磷酸溶解，再加入 KI 加热，冷却后产生黄色 PbI_2 沉淀。

［用途］ 是最主要的铅矿石。是提炼铅丹、铅白、碳酸铅的主要原料。在陶瓷工业中，含铅矿物特别是铅丹、铅白，是制造低温熔块不可缺少的原料，它不仅有极强的助熔作用，并且能明显增加釉的光泽度，提高釉的弹性，降低釉的热膨胀系数。此外含铅釉有很强的发色作用，促进着色剂发色，颜色更加鲜艳。在水晶釉中，含铅矿物是重要原料之一。

实例一：烧成温度 850～900℃唐三彩黄釉配方（%）：

铅丹 70、石英 20、长石 3、氧化铁 7。

实例二：烧成温度 820～960℃透明裂纹釉配方（%）：

釉料配方：熔块 100、苏州土 4。

熔块配方：长石 37.3、石英 7.1、铅丹 35.0、方解石 7.8、碳酸钾 3.8、碳酸钠 9.0。

在此配方中，加入不同金属氧化物或颜料，可制多种彩色釉。

实例三：烧成温度 950～1050℃高光泽生铅釉配方（%）：

铅白 49、石灰石 10、钠长石 18、苏州土 5、石英 15、烧高岭土 3。

实例四：烧成温度 1000～1050℃乳浊生铅釉配方（%）：

铅白 48、方解石 7、苏州土 6、烧高岭土 5、石英 20、氧化锌 2、氧化锡 12。

实例五：烧成温度 1000℃的生铅釉配方（%）：

白铅 27、长石 19、石英 17、瓷土 5、硫酸钙 4、白垩 5、硼酸钙 24、氧化锡 5。

闪锌矿 ZnS

［化学组成］ Zn 67.1%、S 32.9%，成分中常有 Fe、Mn、Cd、Ga、In、Ge 等类质同象混人物，以及 Cu、Sn、Sb、Bi 等机械混入物，Fe 的含量最高可达 26%，富含 Fe 和 Cd 的变种分别称为铁闪锌矿和镉闪锌矿。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=5.42\text{Å}$。

［形态］ 对称型 $3L_i^4 4L^3 6P$，晶形为四面体正负形之聚形，晶面上常具三角形花纹，通常呈粒状、致密块状集合体。

［物理性质］ 颜色变化较大，由无色到浅黄、黄褐、棕褐至黑色，条痕由白至褐色（随含 Fe 量增高而色由浅至深），金刚光泽到半金属光泽，断口上有松脂光泽，透明至半透明，硬度 3～4。性脆，解理平行菱形十二面体{110}完全，比密度 3.5～4，不导电。

［鉴定特征］ 以解理、光泽、与方铅矿共生为其特征。

［用途］ 是最重要的锌矿石。金属锌是镀锌、防腐剂、颜料、铜的合金原料。丙锌矿是提炼氧化锌的原料。在陶瓷工业中，ZnO 不仅有助熔作用，并且能增宽釉的熔融温度范围，避免发生釉裂，此外，锌是结晶釉中优良的结晶原料，生成的硅酸锌晶体呈扇形，十分美丽，具有典雅优美的装饰效果。要注意的是 ZnO 对釉的色彩有较大影响，尤其是铬锡红釉，ZnO 的引入会使其红色消失。

实例一：烧成温度1020～1080℃的磷酸盐乳白釉配方(%)：

熔块100、高岭土5、氧化锌1.5、焦磷酸锌5。

熔块配方：长石34、石英25、高岭土6、氢氧化锰5、碳酸钡3、氧化硼13.0、氧化锌8、方解石6。

实例二：烧成温度1080℃的蓝色大晶花结晶釉配方(%)：

玻璃粉64、石英0.5、星子高岭5.5、硼砂1、氧化锌28.5、氧化钴0.5。

实例三：烧成温度1080℃的锆乳浊釉熔块配方(%)：

石英28、长石24、硼砂16、硼酸2、氧化锌10、锆英石10、方解石9、滑石1、硝酸钾2。

实例四：烧成温度1100～1150℃的柠檬黄面砖釉配方(%)：

熔块90、苏州土7、氧化锌3、钒锡黄3。

熔块配方：硼砂24、长石15、氧化铝粉5、苏州土5、锆英石10、铅丹10、方解石5、氟硅酸钠6。

辰砂 HgS

[化学组成] Hg 86.2%、S 13.8%，有时含少量的Se、Te。

[晶体参数和结构] 三方晶系，$a_0=4.14\text{Å}$，$c_0=9.49\text{Å}$。

[形态] 对称型$L^3 3L^2$，晶体呈细小厚板状或菱面体，集合体呈粒状、致密块状，以及粉末状和皮壳状等。具穿插双晶。

[物理性质] 鲜红、深红至黑红色，有时表现带铅灰的锖色，条痕红色，金刚光泽，半透明，硬度2～2.5，理解平行{$10\bar{1}0$}三组完全。比密度8.09～8.2。不导电，具旋光性。

[鉴定特征] 以颜色、条痕、硬度低、比密度大为特征。

[用途] 提炼汞的最重要矿物原料。辰砂的单晶可作激光调制晶体，是当前激光技术的关键材料。

黄铜矿 $CuFeS_2$

[化学组成] Cu 34.56%、Fe 30.52%、S 34.92%，有时含有微量的Ag、Au、Se、Te等杂质。

[晶体参数和结构] 四方晶系，$a_0=5.24\text{Å}$，$c_0=10.32\text{Å}$。

[形态] 对称型$L_i^4 2L^2 2P$，晶体呈四方四面体，但少见，一般以致密块状集合体、粒状集合体产出。

[物理性质] 黄铜色，往往带有暗黄或斑状锖色。条痕绿黑色，金属光泽，不透明，硬度3～4，性脆，比密度4.1～4.3，无解理，能导电。

[鉴定特征] 以颜色、条痕、硬度为特征。与黄铁矿相似，其区别是黄铜矿呈更黄的颜色和较低的硬度。与自然金的区别在于黄铜矿的墨绿色的条痕、性脆及溶于硝酸。

[用途] 提炼铜的重要矿物原料。陶瓷工业中可作为制造色料的原料。

黄铁矿 FeS_2

[化学组成] Fe 46.55%、S 53.45%，常含Co、Ni、Se类质同象混入物，及Au、As、Sb、Cu等杂质。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，$a_0=5.417\text{Å}$。

[形态] $4L^3 3L^2 3PC$，常见晶形为立方体、五角十二面体，八面体晶型少见，主要单形为立方体、八面体、五角十二面体。

［物理性质］ 浅黄铜色，表面常有黄褐锖色。条痕绿黑或褐黑，金属光泽，硬度 6～6.5，比密度 4.9～5.2，性脆，断口参差状，无解理。

［鉴定特征］ 以其颜色、晶形、晶面条纹、硬度与黄铜矿、磁黄铁矿、白铁矿相区别。

［用途］ 制取硫酸的主要原料。在陶瓷工业中属有害性矿物，尤其是高岭土、瓷土中黄铁矿是有害物质。如苏州高岭土中有害物质主要是黄铁矿。

9.2 硫酸盐矿物

硫酸盐矿物是金属元素阳离子与硫酸根$[SO_4]^{2-}$相结合而成的化合物。这类矿物在自然界中约有 180 种，占地壳总重量的 0.1%，它是很多非金属矿物原料的来源之一。

在硫酸盐矿物中，可以与硫酸根化合的金属阳离子有 20 余种，主要为惰性气体型和过渡型离子，其次是铜型离子，其中最主要的是 Ca、Mg、K、Na、Ba、Sr、Pb、Fe(多半是三价铁)、Al、Cu、Mn、Zn 等。

硫酸盐矿物中，由于$[SO_4]^{2-}$的半径很大(2.95Å)，只有半径较大的二价阳离子 Ba、Sr、Pb 才能与它形成稳定无水化合物，如重晶石，小半径的二价阳离子 Cu、Mg、Fe 等，则需要有 H_2O 配合，形成水壳(在阳离子外面围上一层水分子)，增大其体积才能与$[SO_4]^{2-}$形成稳定的含水化合物，这是许多硫酸盐矿物含有结晶水的原因，如胆矾 $Cu[SO_4]\cdot 5H_2O$，水分子的数量随阳离子半径减小而增多，一般为 2、4、6 和 7 个水分子。这种水分子可因外界水蒸气压的不同而改变，而半径中等的 Ca 既可与$[SO_4]^{2-}$形成无水硫酸盐，如 $CaSO_4$(硬石膏)，又可形成含水硫酸盐 $CaSO_4\cdot 2H_2O$(石膏)。但硬石膏的结晶构造没有石膏稳定，因此，硬石膏一旦出露地表并遇水时，即转变为石膏。一些半径较小的三价阳离子 Fe^{3+}、Al^{3+}则往往与一价碱金属 K^+ 同时参加晶格，形成一些含附加阴离子$(OH)^-$的盐类，如明矾石 $KAl_3[SO_4]_2(OH)_6$。

硫酸盐矿物对称程度较低，主要呈单斜和斜方晶系，其次是三斜三方、六方晶系，而等轴晶系、四方晶系仅只几种而已。

硫酸盐类矿物的颜色较浅，无色或灰白色，含铜、铁的呈蓝色或绿色。玻璃光泽，透明至半透明，硬度不大，为 2～3.5 之间，含水的硫酸盐为 1.5～2。比密度也不高，一般在 2～4 左右，含钡和铅的矿物可高至 4 以上。

下面重点介绍几种与陶瓷工业紧密相关的几种矿物。

重晶石 $Ba[SO_4]$

［化学组成］ BaO 65.7%、SO_3 34.3%，类质同象混入物有 Sr、Pb 和 Ca。

［晶体参数和结构］ 斜方晶系，$a_0=8.878$Å、$b_0=5.45$Å、$c_0=7.15$Å。

［形态］ 对称型 $3L^23PC$，晶体常沿{001}发育成板状或厚板状，有时呈柱状，常见单形有平行双面、斜方柱，集合体呈晶簇、粒状、结核状、钟乳状。

［物理性质］ 无色、白色常见，有时因含杂质而呈黄、褐、淡红和灰色。玻璃光泽，解理面显珍珠光泽。硬度 3.0～3.5，性脆。解理平行{001}完全，平行{210}中等，平行{010}不完全。比密度 4.3～4.5。

［鉴定特征］ 以其比密度较大、解理和晶形为特征，与 HCl 不起作用，可与碳酸盐矿物相区别，以 HCl 浸湿后，染火焰成黄绿色(钼的焰色)与天青石(深紫红色)区别。硬度小，比密度大，可与长石相区别。

[用途] 提炼钡的矿物原料。在陶瓷工业中，钡比其他碱金属具有更强的助熔作用，在低温釉中取代 PbO，可以使釉面光泽增加，但用量过多，因析出硅酸钡晶体使釉面无光。在中高温釉中，BaO 置换 CaO、ZnO 时，可减小釉的弹性，对产品的热稳定性有所增加，此外含 Ba 矿物也是高光泽釉(如水晶釉)的重要原料。

实例一：烧成温度 920～960℃的无铅透明熔块釉配方(%)：

熔块 100、苏州土 3.0、膨润土 0.5、硼酸钙 0.2。

其中熔块配方：长石 30.8、石英 25.1、高岭土 4.0、石灰石 8.1、硫酸钡 7.2、氧化锌 1.6、硝酸钠 1.6、碳酸锂 2.0、硼酸 19.6。

实例二：烧成温度 1000～1120℃的棕色半无光釉配方(%)：

熔块 90、高岭土 5、碳酸钡 4、硼酸钙 1，外加尖晶石型棕色颜料 4.5。

实例三：烧成温度 1140℃的无光釉配方(%)：

长石 30、碳酸钡 24、硅酸铅 12、氧化锌 3、方解石 11、瓷土 9、石英 11。

实例四：烧成温度 1120℃的砂金釉配方(%)：

煅烧硼砂 32.6、长石 1.4、氧化铁 14.7、石英 44、碳酸钡 2.6、硝酸钾 3.7、膨润土 1.0。

石膏 $Ca[SO_4]\cdot 2H_2O$

[化学组成] CaO 32.5%、SO_3 46.6%、H_2O 20.9%，常含有粘土、细砂、有机质等机械混入物。

[晶体参数和结构] 单斜晶系，$a_0=5.76$Å、$b_0=15.15$Å、$c_0=6.28$Å，$\beta=113°50'$。

[形态] 对称型 L^2PC，单晶体为板状、柱状等，单形为平行双面、斜方柱等，集合体呈纤维状、致密块状、土状。

[物理性质] 通常为白色，有时为无色透明，含有杂质时呈灰、淡黄和淡红色。玻璃光泽，解理面呈珍珠光泽，纤维状呈丝绢光泽。硬度 2，性脆，解理平行{010}完全、{100}和{011}中等，解理块在{010}面上呈平行四边形，形成 66°和 114°的夹角，薄片具挠性，比密度 2.3，透明而呈月白色反射光的石膏晶体称透石膏，纤维状集合体称纤维石膏，细粒致密块状的石膏称雪花石膏。

[鉴定特征] 以低硬度、一组极完全解理及二组斜交解理和形态为其特征，与碳酸盐区别是石膏通常遇 HCl 时不起泡。

[用途] 主要用于塑造模型。在陶瓷工业上制造石膏模(用于注浆、压坯等)。制造石膏模的是 $CaSO_4\cdot 2H_2O$，经炒制或高压釜蒸制脱水所得的 $CaSO_4\cdot \frac{1}{2}H_2O$，称为半水石膏，半水石膏有 α-半水石膏和 β-半水石膏，α-半水石膏是在高压釜中由石膏在水蒸气存在的条件下加压蒸煮而得到的针状晶体，其水分以液态形式慢速脱去，做出的石膏模强度大、吸水率小、使用寿命长。而 β-半水石膏(β-$CaSO_4\cdot \frac{1}{2}H_2O$)是在锅中常压下炒制而得的不规则的晶体碎屑，其水分是以气态形式脱去，炒制温度在 170～180℃，制得的石膏模吸水率大、强度稍低、使用寿命短，注浆用的石膏模，多为 β-$CaSO_4\cdot \frac{1}{2}H_2O$ 所制。

硬石膏 $CaSO_4$

[化学组成] CaO 41.2%、SO_3 58.8%，有时含类质同象混入物 Sr 和 Ba。

[晶体参数和结构] 斜方晶系，$a_0=6.97$Å、$b_0=6.98$Å、$c_0=6.23$Å。

［形态］ 对称型 $3L^2 3PC$，单晶体为板状、柱状，但晶体少见，集合体呈纤维状、致密粒状或块状。

［物理性质］ 白色或无色，常因含杂质而呈暗灰色，有时微带红色或蓝色，玻璃光泽，解理面珍珠光泽，硬度 3～3.5，解理平行{010}、{100}完全，{001}中等，这三组解理面相互垂直，可裂成火柴盒状小块，比密度 2.9～3.0。

［鉴定特征］ 以三组互相垂直的解理为特征，它与碳酸盐区别是遇酸不起泡。

［用途］ 同石膏的用途。

9.3 卤化物矿物

卤化物为金属元素阳离子与卤族元素(氟、氯、溴、碘)阴离子相化合的化合物。卤化物的矿物种数在 120 种左右，其中主要是氟化物和氯化物，而溴化物和碘化物极为少见。

组成卤化物的阳离子部分，主要是惰性气体型离子的钾、钠、钙、镁等元素。此外，也有部分铜型离子。如 Ag、Cu 等所组成的卤化物，但为量极少。

在卤化物中，由于氟离子的半径(1.33Å)最小，它主要与半径较小的阳离子 Ca^{2+}、Mg^{2+} 等组成稳定的化合物，并且大多不溶于水，而氯、溴、碘的离子半径(分别为 1.81Å、1.96Å、2.20Å)较大，它们总是与半径较大的阳离子如 Na^+、K^+ 等形成化合物，并且易溶于水。

卤化物大多为典型的离子晶体(如 NaCl)，因而它们在物理性质上表现为无色透明，比密度小，玻璃光泽，折射率低，导电性差。

卤化物主要形成于热液和外生作用过程中，在热液过程中往往形成大量的萤石，在火山喷发活动产物中，有氯化物和氟化物存在。在外生作用过程中，氯具有很好的迁移能力，它往往与钠、钾、镁组成溶于水的化合物，在干涸的含盐盆地下，形成相应化合物的沉淀和聚积。

主要矿物简述：

萤石(氟石)CaF_2

［化学组成］ Ca 51.33%，F 48.67%，成分中有时含稀土元素 y(钇)、Ce(铈)，以类质同象置换 Ca，当含 y 较多时，称钇萤石。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=5.45$Å。

［形态］ 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶体呈立方体，其次是八面体，少数为菱形十二面体。立方体晶面常出现与棱平行的嵌木地板式条纹，集合体为致密状、块状。

［物理性质］ 无色透明者少见，常被染成各种美丽的颜色，其颜色与其生长过程中温度的变化有密切关系，紫色者形成温度高，淡蓝色形成温度次之，而绿色者形成的温度较低。玻璃光泽，硬度 4，性脆。八面体{111}解理完全，比密度 3.18，阴极射线照射发紫色荧光。有些变种具热光性，太阳晒后发磷光。

［鉴定特征］ 以立方体的晶形，八面体完全解理，玻璃光泽易于识别。与方解石的区别是萤石加 HCl 不起泡，与长石、石英的区别是萤石的硬度小。

［用途］ 冶金工业中作熔剂，化学工业中用来制取氢氟酸，无色透明的晶体可制光学仪器中的棱镜和透镜。氟在火箭推进燃料中作氧化剂，在原子能工业上用于分离轴的同位素等。

在陶瓷工业上，是重要的熔剂原料，主要用在釉料上，它的作用是降低釉料的熔融温度，增加釉的流动性，还可起乳浊作用。提高釉面的白度，同时增大釉浆的悬浮性(使釉浆不易沉

淀）。此外，在颜色釉中加入少量的萤石，可增加釉面光泽并起到增加显色作用，特别是对绿色更为显著。

实例一：烧成温度 1140～1160℃的低温生料釉配方（%）：

石英 15、长石 52、烧滑石 3、萤石 4、石灰石 8、氧化锌 9、苏州土 5。

实例二：烧成温度 1140～1180℃的彩釉砖底釉配方（%）：

长石 38、石英 20、白粘土 7、废瓷粉 7、萤石 5、锆英石 5、氧化锌 5、滑石 10。

实例三：烧成温度 1200～1250℃的半透明白釉配方（%）：

冰晶石 25、萤石 15、粉土 20、石英 40。

实例四：烧成温度 1200～1260℃的透明绿釉配方（%）：

长石 65、石灰石 15、萤石 5、瓷土 6、石英 5、氧化铁 4。

石盐 NaCl（又称岩盐）

[化学成分] Na 39.5%，Cl 60.6%。常含有 Br、Rb、Cs、Sr 等以及气泡、卤水、泥质、有机质等包裹体，Ca 和 Mg 的氯化物和机械混入物。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，$a_0=5.628\text{Å}$。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，常见晶形为立方体，集合体为致密块状、粒状、板状等。

[物理性质] 纯净者无色透明，因含杂质而出现各种颜色，如蓝色（存在中性钠原子）、灰色（含泥质细点）、黄色（含氢氧化铁）、红色（含无水或少水的氧化铁）、褐黑色（含有机质）等。玻璃光泽，受风化后呈油脂光泽，硬度 2～2.5，性脆，立方体解理完全，比密度 2.1～2.2，易溶于水，有咸味，烧之火焰呈黄色（Na 反应），熔点 804℃。

[鉴定特征] 硬度、易溶解、有咸味、立方体晶形、立方体解理、烧时火焰呈黄色为其特征。

[用途] 是重要的食料和食物防腐剂，又是重要的化工原料，还可用于造纸、纺纸、染料、陶瓷、玻璃、医药等各部门，电气工业上制作发强光的充钠蒸汽灯泡等。陶瓷工业中作挥发釉原料。

钾盐 KCl

[化学组成] K 52.5%、Cl 47.5%，Br 和微量 Rb、Cs 以类质同象方式置换 Cl 和 K。常含气态和液态包裹物（N_2、CO_2、H_2、CH_4 及 He 等）及 NaCl、Fe_2O_3 等杂质。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，$a_0=6.277\text{Å}$，晶体结构属 NaCl 型。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶体常呈立方体或立方体与八面体的聚形，集合体为致密块状、粒状。

[物理性质] 纯净者无色、透明，含细微气泡者呈乳白色，含细微赤铁矿者呈红色。玻璃光泽，硬度 1.5～2.2，立方体{100}解理完全，性脆，比密度 1.97～1.98，味苦咸且涩。易溶于水，烧之火焰呈紫色（钾反应），熔点 790℃。

[鉴定特征] 与岩盐很相似，以味苦咸且涩和火焰呈紫色与岩盐区别。

[用途] 用于制造钾肥和化学工业上制取各种含钾化合物。陶瓷工业中可作挥发釉原料。

9.4 磷酸盐矿物

磷酸盐是金属元素阳离子与磷酸根$[PO_4]^{3-}$相化合而成的盐类，矿物种类达200种。在陶瓷工业中应用的主要是磷灰石、骨灰羟基磷灰石。

磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3(F、Cl、OH)$

［化学组成］ CaO 55.38%、P_2O_5 42.05%、F 1.25%、Cl 2.33%、H_2O 0.56%，磷灰石按附加阴离子的不同可分为氟磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3(F)$、氯磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3Cl$、羟磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3(OH)$等三个变种，它们相互之间成类质同象关系。自然界中以氟磷灰石为最常见，简称磷灰石。此外，还有一种碳酸磷灰石 $Ca_5[PO_4、CO_3(OH)]_3(F、OH)$，以含有$[CO_3]^{2-}$为特征。

［晶体参数和结构］ 六方晶系，$a_0=9.37Å$、$c_0=6.88Å$。

［形态］ 对称型L^6PC，常见晶体呈长短不一的六方柱状，以六方柱、六方双锥和平行双面等较为发育，集合体呈粒状、致密块状、肾状、钟乳状等。

［物理性质］ 颜色为灰白、浅绿、蓝绿、黄、褐等，但以各种色调的绿色较为常见。沉积岩中因含有机质染成深灰至黑色。玻璃光泽，断口油脂光泽，硬度5，解理平行{0001}不完全，断口不平坦，比密度2.9～3.2，加热后常可出现磷光。

［鉴定特征］ 以六方柱形的晶形、玻璃光泽和硬度为特征。但对于胶磷石不易识别，可用HNO_3滴于其上，再加少许钼酸铵粉末，如粉末由白色变为黄色，则指示有磷的存在。

［用途］ 用于制造磷肥，以及化学工业上的各种磷盐和磷酸。如果磷灰石中还含有铈、钇或铀时应当综合利用。

在陶瓷工业上用作骨灰瓷和生物陶瓷的原料，其胚体透明度很好，但形状的稳定性差。

9.5 自然元素矿物

自然元素矿物是指某种元素以单质形式存在于自然界的矿物。现在已知的自然元素矿物有近百种，约占地壳总重量的0.1%。主要包括铂族元素(钌、铑、钯、锇、铱、铂)，部分铜族元素(铜、银、金)，半金属元素(砷、锑、铋)和非金属元素(硫、碳)等。这类矿物虽然在自然界为数不多，但其中的金、铂、硫、碳等元素可以显著富集成矿。

主要矿物描述如下：

自然金 Au

［化学组成］ 纯金极少有，成分中常含Ag、Cu、Rh、Pd、Bi、Fe等元素，当银(Ag)含量达15%～50%时，称银金矿。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=4.078Å$，原子呈立方最紧密堆积。

［形态］ 对称型$3L^44L^36L^29PC$，完好晶体少见，晶形以八面体为主，其次为菱形十二面体，而立方体罕见。常呈分散粒状或不规则树枝状集合体，偶尔呈较大的块状。

［物理性质］ 金黄色，含银、铜时颜色就变浅，条痕金黄色，强金属光泽，硬度2.5～3，无解理，断口锯齿状，比密度15.6～18.3，纯金为19.3。具强延展性，可以锤成金箔，熔点1062℃，有良好的传热性和导电性，化学性质稳定，不溶于酸，只溶于王水。

［鉴定特征］ 金黄色，强金属光泽，低硬度，比密度大，富延展性，在空气中稳定，不氧化，只溶于王水等为其特征。

［用途］ 自然金几乎是金唯一的来源。金与银、铜做成的合金可作仪器、仪表的零件，喷气式飞机的某些部件。纯金用于电子工业及尖端技术。陶瓷工业上制作金水，装饰瓷器表面。金还可做装饰品。国际市场上通常以黄金代表货币价值。故一个国家国库中黄金储存的多少意义很大。

自然铜 Cu

［化学组成］ 原生自然铜成分中有时含 Au(达 2%～3%)、Ag(3%～4%)、Fe(达 2%～3%)等混入物，次生自然铜的成分较纯净。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=3.61$Å，原子是立方最紧密堆积。

［形态］ 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，单晶体为立方体，但少见，主要单形有立方体、八面体、四六面体、菱形十二面体，集合体为不规则的树枝状、片状或致密块状。

［物理性质］ 铜红色，表面常因氧化而出现棕黑色，被膜条痕为光亮的铜红色，金属光泽，无解理，锯齿状断口，硬度 2.5～3，比密度 8.5～8.9，熔点 1083℃，具延展性、良好的导电性、导热性。

［鉴定特征］ 铜红色、比密度大、富延展性、溶于稀 HNO_3 为其特征，加氨后溶液呈天蓝色。经常与蓝铜矿、孔雀石等共生为其特征。

［用途］ 产量多时，可作铜矿石开采，铜及其合金应用于电气工业、机器制造、交通运输、化学及国防工业等各方面。陶瓷工业中可作为制色料用的原料。

自然铂 Pt(白色)

［化学成分］ 成分中常含 Fe，当 Fe 的含量达 9%～11%时为粗铂矿，实际上一般所谓自然铂，大多数是粗铂矿，此外，还常含 Pd、Ir、Rh、Ni、Os、Cu 等类质同象混入物，当这些元素含量高时，就相应地构成它的亚种。

［晶体参数和结构］ 等轴晶系，$a_0=3.924$Å。

［形态］ 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，单晶体少见，偶尔呈立方体细小晶形产出，通常呈不规则细小颗粒状，有时也呈较大块体。

［物理性质］ 银白色至钢灰色，条痕为光亮钢灰色，金属光泽。硬度 4～4.5，无解理，断口锯齿状，比密度 21.5(纯铂)，富延展性，熔点 1774℃，具延展性，微具磁性(含 Fe 多的，磁性显著)，热和电的良导体。

［鉴定特征］ 以银白至钢灰的颜色，富延展性，比密度大，熔点高以及遇普通酸不溶解为其特征。

［用途］ 铂的高度化学稳定性和难溶性广泛应用于科学技术和化学工业上，用以制作高级化学器皿，或与镍等制造特种合金。

自然硫 S

［化学组成］ 自然界中的硫具有三种同质多象变体，即 α-硫(斜方晶系)、β-硫和 γ-硫(单斜晶系)。在自然条件下只有斜方晶系 α-硫才是稳定的，如果温度高于 95.6℃，α-硫转变为单斜晶系的 β-硫，但当温度降低时，仍回复为 α-硫。γ-硫结晶成单斜晶系，但在常温常压下是不稳定的，而转变为 α-硫。此外，还有呈胶体(非晶质)的硫，通常所说的硫是稳定的斜方晶系的 α-硫。成分一般不纯净，火山成因的硫往往含有少量的 Se、As、Te、Tl 等类质同象混入物，Se

的含量达1%～5.2%称为硒硫。同时，许多其他矿床产出者夹有粘土、有机质、沥青等机械混入物。

[晶体参数与结构] 斜方晶系，$a_0=10.437$Å，$b_0=12.845$Å，$c_0=24.369$Å。

[形态] 对称型 $3L^2 3PC$，晶体呈双锥状或厚板状，主要单形有平行双面、斜方双锥、斜方柱，集合体呈致密块状、土状、钟乳状等。

[物理性质] 呈各种不同色调的黄色，条痕白色或至微黄色，晶面为金刚光泽，断口为油脂光泽，透明至半透明。无解理，断口贝壳状，硬度1～2，性极脆，比密度2.05～2.08，熔点低(119℃)，燃点低(270℃)，燃烧时产生 SO_2 臭气。为热、电的绝缘体，摩擦产生负电，用手握之置于耳旁，可以听见轻微的炸裂声。

[鉴定特征] 黄色、油脂光泽、硬度小、性脆、有硫臭味、易燃(燃烧时生成淡蓝色火焰)，易熔为其特征。

[用途] 硫是化学工业上的基本原料，主要用来生产硫酸。此外，还用于造纸、纺织、橡胶、火柴、农用化肥等方面。陶瓷工业中，用于制石膏模的种模。

金刚石 C

[化学组成] 常含石墨包裹体及Si、Al、Mg、Fe、Ti、Mn、Ca等混入物，此外，还有气、液包裹体。

[晶体参数和结构] 等轴晶系，$a_0=3.56$Å，金刚石的晶体结构表现于碳原子位于立方晶胞的8个角顶和6个面中心，并在其8个小立方格的半数中心相间地分布着4个碳原子，每个碳原子都与周围4个碳原子相连接，并且每两个相邻碳原子之间的距离均相等(1.54Å)。形成四面体配位，整个构造可视为以角顶相连接的四面体的组合，碳原子间以共价键连接，致使金刚石具有高硬度、高熔点、不导电的性质，在温度、压力变化很大的范围内化学性质很稳定。

[形态] 对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$，晶形为八面体、菱形十二面体，较少立方体。

[物理性质] 无色透明，或带有蓝、黄、褐和黑色，标准金刚光泽，硬度10，是硬度最大的矿物，平行{111}解理中等。比密度3.47～3.56，抗磨性最强，熔点高。化学稳定性强，有高的绝缘性、抗酸性、抗碱性，具发光性，曝晒后，夜间发淡青蓝色的磷光，在紫外线照射下发绿色、天蓝色或紫色磷光，但也有不发光的。

[鉴定特征] 极高的硬度、金刚光泽、晶形轮廓呈浑圆状、具发光性为其特征。

[用途] 作高硬切割材料及高级研磨材料、精密仪表零件、原子能工业上的高温半导体、国防工业上的红外光谱仪等尖端产品的原料，在地质勘探工作中用金刚石镶嵌钻头，提高钻探效率。此外，晶体完美、色彩鲜艳的可作为贵重的宝石。

第三篇　岩石学基础

1　岩石学概论

1.1　岩石的概念

什么是岩石呢？就是人们通常所说的“石头”，不过“石头”是对岩石的通俗的称呼，最多加以颜色、软硬的说明，其实岩石在地质科学中是一个专门术语，它具有一定的内容和科学意义。

岩石究竟包括那些内容呢？首先岩石是在地壳形成与发展过程中，在不同的物理化学条件下的各种地质作用所形成的产物，是组成地壳的固态物质，它们构成了地球的岩石圈（如硅铝圈的分布由地球表面到深度 5～70km 处，这一圈的物质主要为岩浆岩、沉积岩、变质岩）。有的人干脆就认为岩石是一种高温的硅酸盐熔体经凝固而成的，以后经过破坏、搬运和沉积等作用生成一种新的岩石。其次岩石是矿物的天然集合体，它是一种或几种造岩矿物和部分玻璃物质所组成（如花岗岩主要是由石英、长石和云母组成），并且岩石具有一定的结构和构造（如花岗岩为似斑状结构、块状构造），不同岩石具有不同的结构和构造。同时，岩石也和自然界其他事物一样，每个岩体都有其发生、发展和变化规律（如超基性岩变成蛇纹岩、滑石片岩，在变质作用下花岗岩形成石英片岩、片麻岩）等。

由上述，岩石的定义应是：岩石是地壳在形成与发展过程中，在各种地质作用下所形成的固态物质，是地壳的组成部分，它们是矿物和玻璃物质的天然集合体，并且有着一定的结构、构造和变化规律。

因此，根据岩石的定义可知，没有地质意义的矿物集合体，如人造岩石（由水泥凝结的砂砾，用岩石配料烧成的砖块，经过高温煅烧过的硅酸盐工业产品——陶瓷、瓷器、耐火材料、水泥、玻璃等）、冶金工业的副产品——炉渣、矿渣等，不能称为岩石。有地质意义但没有形成固态物质——如石油、天然气等，也不能称为岩石，但是与岩石却有密切的关系。单独一块矿物不能算作岩石，而只是矿物，同一种矿物的许多颗粒集合起来，才可以叫岩石，通常称为单矿物岩石。工业上有开采利用价值的矿物集合叫做矿床，如符合技术要求的白云岩就是白云石矿床。

1.2　岩石的分类

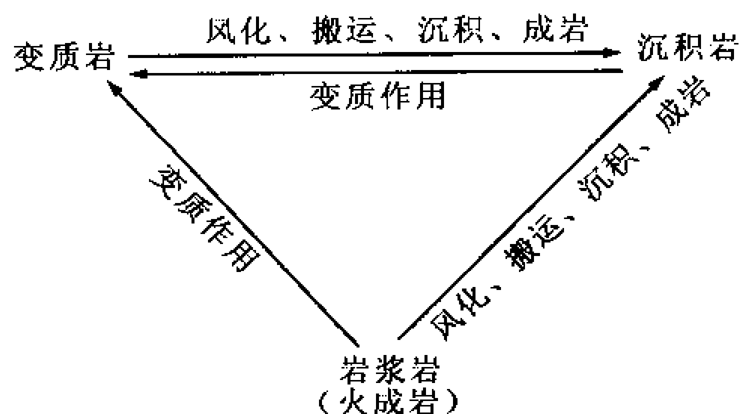
自然界中，岩石的种类很多，根据成因可分为三大类。

①岩浆岩（火成岩）：是由岩浆浸入地壳中或喷出地表冷凝而成的岩石，如橄榄岩、玄武岩等。

②沉积岩（水成岩）：是在地表或地表下不太深的地方，在常温常压下，由母岩的风化产物（如砂、砾、泥质或溶解物质）经搬运、沉积、固结而成的岩石。如灰岩、砂岩、页岩等。

③变质岩：是原来已存在的各种岩石，由于受到地壳运动、岩浆活动等内力作用的影响，在不同的温度和压力条件下，经改造成的岩石，如大理岩、片岩、片麻岩等。

每一种类型的岩石都产生在特定的条件下，但它们之间的界线有时并不能截然分开，其间是逐渐过渡的，有的因成因复杂而不能简单地划归为一种成因。三大类岩石在一定的条件下往往可以互相转变，其关系如下：



1.3 岩石的分布

各类岩石在地壳中的分布是很不均匀的，就地表来说，沉积岩分布最为广泛，约占75%，而岩浆岩、变质岩占地表面积的25%，距地表越深，岩浆岩、变质岩的分布越多，尤其是岩浆岩。从地壳的重量来说，岩浆岩占地壳总重的75%，而沉积岩、变质岩占地壳总重约25%。

2 火成岩(岩浆岩)通论

2.1 岩浆及火成岩的概念

2.1.1 岩浆的概念

根据对近代火山溢出大量的熔岩及岩石的研究，大量的事实表明，火成岩是由岩浆冷却凝固而成，故火成岩也称岩浆岩。岩浆是一种高温的富含挥发性组分以硅酸盐为主的流动熔融体。下面对岩浆的一些特性简述如下：

①岩浆的成分

在岩浆中可含有大量的气相物质，这点在火山爆发时，常伴有大量气体喷出就是证明。例如1906年维苏威火山爆发时，喷出气柱高达13000m。阿拉斯加火山每年喷出HCl气体达125万吨，HF 20万吨，这些就是岩浆熔解的挥发性组分，约占岩浆成分的10%左右。其中以水蒸气为主，并含有氯化物(HCl、NaCl、KCl、NHCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$，以及Fe、Pb、Co、Ni、Mn等的氯化物)、氟化物(SnF_4)、硫化物(H_2S、SO_2、SO_3、AsS)及CO_2、CO、S、Cl、F等气体，当熔岩凝固时，挥发分大多逸出散失。由于岩浆中有挥发分的存在，对岩浆性质就有很大影响。它可降低岩浆的温度，延续结晶时间，促使结晶颗粒粗大，同时它还降低岩浆的粘度，增强岩浆的内部压力，使岩浆的熔解度加大，活动性加强，可以携带搬运有用组分使之富集成矿。

岩浆的主要成分是硅酸盐。1787年冰岛(大西洋北部)炽热的玄武岩浆大量溢出，铺满大片地区，形成了玄武岩。在花岗岩体的边缘地区，常可见到结晶的花岗岩脉插入到围岩里。这也证明花岗岩脉是由一种高温熔体浸入冷却凝固而成。这些岩石的主要成分是硅酸盐，由此可知岩浆的成分也是这样。

金属硫化物及氧化物亦是岩浆中的重要组成部分，如超基性岩地区的铬矿床，就可从岩浆中直接结晶而成。又如在我们观察岩石薄片时，常可见到像磁铁矿这种结晶较早的矿物，其他内生金属矿床亦与岩浆活动有关。这些客观事实充分地表明，岩浆中尚含有大量金属组分。

总之，从成分来说，岩浆的主要组分是硅酸盐，其次含有金属的氧化物和硫化物以及挥发分等。

②岩浆的温度

岩浆温度不能直接测量，但根据对火山熔岩流的测量结果，表面温度为1000～1200℃，这是由于岩浆自身喷发的气体与空气接触发生强烈的氧化(燃烧)的结果。熔岩流表面以下1m左右温度约为720～850℃。此外根据人工岩浆实验及矿物生成温度的研究，一般认为地下岩浆开始结晶时不会超过1000℃。

③岩浆的粘度

粘度大影响岩浆的流动性和结晶作用。通常在岩浆中SiO_2含量越高，粘度越大，流动就越缓慢。其次是岩浆温度及挥发分的含量亦对岩浆的粘度有显著的影响，温度越高，挥发分越

多，可以降低岩浆的粘度。

很多实际资料表明，火成岩体的地质特征及岩石性质等与岩浆粘度大小有密切关系。如玄武岩呈岩流产出，因为这种岩浆中 SiO_2 含量较低，粘度小易流动，所以形成分布面积很广的岩流；又如流纹岩常呈岩钟产出，因为这种岩浆中 SiO_2 含量高，其挥发组分因岩浆逸出地表而消失，这就促使岩浆粘度大不易流动，形成面积不大的岩钟；相反，化学成分与流纹岩一致的花岗岩，由于它在地下深处的冷凝过程中受挥发组分影响，粘度较小形成较大的岩基和形态复杂的岩株，这种岩体的超覆现象较常见，岩体边部的小岩枝（岩脉）又非常发育。在岩石结构上，粘度大的岩浆易形成玻璃质或半晶质岩石，粘度小则易形成全晶质岩石。在岩石构造上，粘度小时成分扩散均匀，易形成块状岩石，粘度较大则可形成流纹构造或条带状构造。

④岩浆的压力

由于岩浆在地壳中的位置不同，所承受的静水压力也不一样。其内部压力则视挥发分富集程度而定，而挥发分的富集又与岩浆温度及地质环境有关。故岩浆凝固的各阶段，压力的差异甚大。内压力是影响岩浆活动的主要因素之一，并直接影响内生矿床的形成。

2.1.2 火成岩的概念

岩浆冷却凝固结晶而形成火成岩，亦称岩浆岩。产于地壳中的叫侵入岩，当熔浆流溢出地表后凝固的叫喷出岩（火山岩）。

毫无疑问，绝大多数火山岩是由呈液体状态的岩浆形成的，但对于花岗岩的成因总是至今尚有争论。一种认为是由岩浆凝固而成，但也有人认为大面积的花岗岩体，则是在高温度条件下，由别的岩石转变而成的。

火成岩常具有以下几个方面的特征：

①火成岩大部分为块状及结晶结构的岩石，但在岩体边部或喷出岩中，由于急剧冷却，形成隐晶质或玻璃质，且常具斑状结构。因此斑状结构与玻璃质是由熔融体形成岩石的标志之一。

②有些矿物仅产于火成岩中，如霞石、白榴石、方钠石等。

③岩体常穿插其他围岩，围岩亦受到热变质的烘烤现象。

④岩体中常见有围岩的碎块（捕虏体），特别在岩体边部较为常见。

⑤火成岩不具层理构造，但喷出岩中有气孔及杏仁状体，尤以玄武岩中最为显著。

⑥火成岩中没有化石。

2.2 火成岩的成分

火成岩的成分是指其矿物成分及化学成分，它是反映火成岩最本质的一个方面，是火成岩分类的依据。研究火成岩的成分，对掌握火成岩在空间、时间上的变化规律，成因和生成条件，岩体间的相互关系，次生变化规律等有重要意义，又可指导找矿与勘探工作。研究火成岩的成分，对其在各工业领域的应用也有很重要的意义。

2.2.1 火成岩的矿物成分

岩石是矿物的集合体，研究火成岩的矿物对了解岩石的化学成分、地球化学特征、岩石的成因和生成环境有直接意义，同时矿物成分又是火成岩分类、命名的依据之一。

(1)火成岩中矿物成分

火成岩中矿物成分种类较多，但主要有长石族、石英、辉石族、角闪石族、云母族、橄榄石族及其他，平均含量见表3.2.1。

表3.2.1 火成岩主要矿物及其平均含量

矿物名称	平均含量(%)	矿物名称	平均含量(%)	备　注
长石族	60	其他硅酸盐类(橄榄石、似长石族、锆英石)	6	其他矿物中还包括一些次生矿物如绿泥石、蛇纹石等
石　英	12			
角闪石族及辉石族	17	其他非硅酸盐类(磁铁矿、磷灰石)	1	
云母族	4			

(2)火成岩中矿物成分的分类

①根据矿物在各类岩石中的相对含量分类

主要矿物　岩石中含量最多的矿物(>20%)，它的存在是决定岩石所属大类的依据。例如花岗岩中长石和石英都是主要矿物，二者缺一不可。若没有石英就不能叫花岗岩。辉长岩由辉石和斜长石组成，若无辉石则不能叫辉长岩，而只能叫斜长岩。

次要矿物　含量比主要矿物少，一般在1%～10%之间。对划分岩石大类不起作用，而在决定种属命名时必须考虑。如以石英闪长岩和花岗岩相比，前者石英是次要矿物，而在花岗岩中石英是主要矿物。如辉石在辉长岩中为主要矿物，在花岗岩中则可有可无。因此在岩石命名时，往往以次要矿物为形容词加在岩石名称之前。

副矿物　此种矿物含量最少，通常在1%～3%以下。一般虽不影响岩石种属命名，但主要矿物和副矿物之间亦可相互转化。例如某地磷灰石矿床，原定为辉岩，把磷灰石当成了副矿物。但经过深入研究后，否定了磷灰石是副矿物，而作为岩石种属、岩相划分的一个依据，如分为榍石型花岗岩、磷灰石型花岗岩、锆石型花岗岩……根据副矿物的标型特征，可以对比岩体生成时代，确定与一定内生矿床的关系。常见副矿物有磷灰石、锆英石、榍石、磁铁矿等。

②主要造岩矿物的颜色分类

从造岩矿物的颜色也反映岩石的化学成分。在各大类火成岩中造岩矿物的颜色亦有差别，因此研究颜色也具有分类和命名的意义。

暗色矿物(铁镁矿物)　含铁、镁较多，矿物的颜色也较深，它包括橄榄石、辉石、角闪石、黑云母等。

浅色矿物(硅铝矿物或称长英矿物)　含硅、铝较多，矿物颜色较浅，一般呈灰白、黄色、浅红色等。它包括长石、石英、似长石、白云母等。

岩石中所含暗色矿物与浅色矿物的量比，能反映各大类岩石中化学成分的变化。例如花岗岩类含暗色矿物在10%以下，闪长岩类约30%～40%，橄榄岩或辉石岩类则几乎不含浅色矿物。岩石学中，将暗色矿物的百分含量称为色率。在肉眼鉴定时，色率是分类命名的依据之一。通常我们把花岗岩等浅色矿物占优势的岩石，叫浅色岩，将橄榄岩、辉石岩、辉长岩等暗色矿物占优势的岩石，称为暗色岩。暗色矿物的含量百分比，叫做色率。

③造岩矿物的成因分类

火成岩冷却凝固结晶过程及固结成岩以后，在漫长的地质年代中，由于外因的影响，会发生一系列的变化，因此构成火成岩的矿物成分及它们的成因也就不一。粗略来说可以分为两类：

原生矿物 指在岩浆冷却结晶过程中析出的矿物，如橄榄石、辉石、角闪石、长石、石英、云母等。这些矿物在岩石中彼此含量的多少，可以决定火成岩所属类别。

次生矿物 当原生矿物经受后来热液作用以及风化作用等的影响，形成新的矿物，如橄榄石变成蛇纹石，其他暗色矿物常变为绿泥石，斜长石经分解变为黝帘石、绿帘石、绢云母，钾长石变为高岭土等。

2.2.2 火成岩的化学成分

对火成岩化学成分进行研究，可以了解各类火成岩化学成分上的共同性与特殊性，作为划分岩类的基本依据，尤其对玻璃质的岩石。对岩体研究来说，从火成岩体化学成分的变化规律中，研究岩体的形成在时间与空间上的变化规律，查明与成矿的关系，用以指导找矿勘探。

①火成岩中氧化物的平均含量

火成岩的化学成分复杂，几乎包括地壳上所有元素，但是火成岩中所含的主要元素并不多，主要是 O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti 等 9 种，其含量占火成岩总重的 99%左右，通常称为造岩元素。

火成岩的成分多以氧化物表示，主要氧化物是：SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、FeO、MgO、CaO、Na_2O、K_2O、TiO_2、H_2O。除 H_2O 以外，其余 9 种氧化物的含量占火成岩总重量的 99%以上，其中以 SiO_2 最多，Al_2O_3 次之。其含量见表 3.2.2。

表 3.2.2 火成岩的平均化学成分(5159 个火成岩化学分析的平均值)

氧化物	重量百分比	元素	重量百分比
SiO_2	59.14	O	46.42
Al_2O_3	15.34	Si	27.59
Fe_2O_3	3.08	Al	8.08
FeO	3.80	Fe	5.08
MgO	3.49	Ca	3.61
CaO	5.08	Na	2.83
Na_2O	3.84	K	2.58
K_2O	3.13	Mg	2.09
H_2O	1.15	Ti	0.721
TiO_2	1.05	P	0.158
P_2O_5	0.299	H	0.130
MnO	0.124	Mn	0.125
CO_2	0.101		
其他	0.376	其他	0.586

②各类火成岩化学成分的变化规律

各类火成岩化学成分随着 SiO_2 含量的增加而有规律地变化，根据 SiO_2 的含量可将火成岩分五类：

超基性岩	SiO_2<45%	酸性岩	SiO_2 65%～75%
基性岩	SiO_2 45%～52%	超酸性岩	SiO_2>75%
中性岩	SiO_2 52%～65%		

岩浆中主要氧化物变化的一般规律见图 3.2.1。

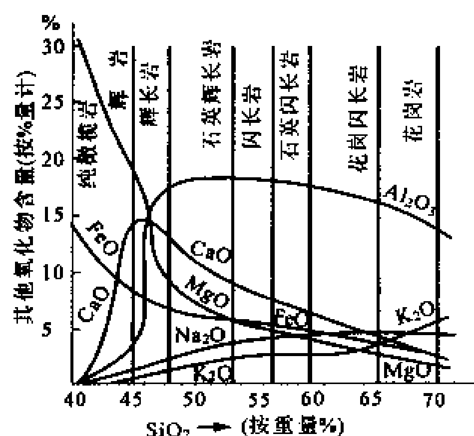


图 3.2.1　各类火成岩中化学成分的变化规律

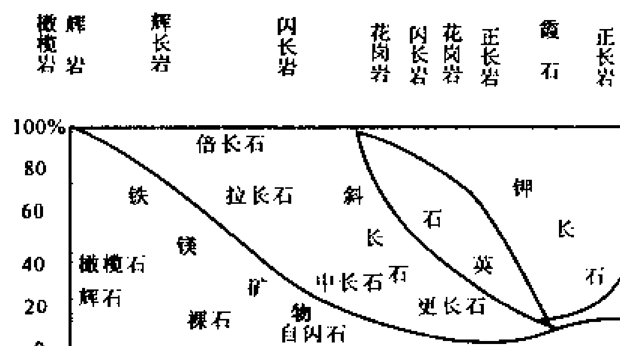


图 3.2.2　各类侵入岩内矿物成分的变化关系

2.2.3　火成岩矿物共生组合的规律

火成岩的矿物成分与化学成分有密切关系，它影响到矿物的共生组合。火成岩中各类侵入岩内矿物成分的变化关系如图 3.2.2 所示。

在超基性岩中，SiO_2 含量低于 45%，FeO、MgO 含量高，K、Na、Ca、Al 很少，因而以铁镁矿物为主，如橄榄石、辉石及角闪石等，长石矿物很少甚至没有。

在基性岩中，SiO_2 含量增加到 45%～52%，CaO、Al_2O_3 大量出现，FeO、MgO 含量相对减少，但仍然很多。因此基性岩中除暗色矿物外，基性斜长石大量出现。铁镁矿物以辉石为主，斜长石为拉长石，其次可有倍长石。

在中性岩中，SiO_2 含量达 52%～65%，FeO、MgO 继续减少，故暗色矿物常低于浅色矿物，约为 30%～40%，以角闪石为主，K_2O、Na_2O 也比基性岩多，CaO 则较基性岩少，故斜长石为中长石，石英可少量出现，如石英闪长岩。

酸性岩中 SiO_2 含量很高，达 65%以上，K_2O、Na_2O 多，FeO、MgO 的含量少，所以在花岗岩中以浅色矿物为主，出现了钾长石与石英为主的共生组合，暗色矿物为黑云母，其次是角闪石，含量约占 10%～15%，斜长石则为酸性斜长石。

对正长岩与霞石正长岩来说，SiO_2 含量相当于中性岩，但特点是 K_2O、Na_2O 含量特别高，因而构成以钾钠长石为主的岩石，石英极少或没有。特别在霞石正长岩中，出现了似长石族矿物，更不可能出现石英，FeO、MgO 含量较酸性岩中多，故暗色矿物亦较酸性岩多，含量约占 15%～20%。同时暗色矿物中含钠亦高，出现了霓石、霓辉石、钠闪石等。

可以看出，随着 SiO_2 的增高，FeO、MgO、CaO、K_2O、Na_2O 等含量亦有所改变，因而出现不同的矿物共生组合，这就是各成分之间相互联系而又制约的结果。如很难看到镁橄榄石、似长石族矿物等与石英共生，这些称为不饱和矿物。当岩浆中 SiO_2 含量较多时，只能形成斜方辉石或钾(钠)长石。



$$Mg_2[SiO_4]+SiO_2=2Mg[SiO_3]$$

镁橄榄石　　　　　　斜方辉石



$$K[AlSi_2O_6]+SiO_2=K[AlSi_3O]$$

白榴石　　　　　　钾长石

除了酸度 SiO_2 影响矿物共生组合外，另一方面是钙碱性（正常）与碱性两个不同系列的岩石，矿物共生又有差异。在碱性系列岩石中，$K_2O+Na_2O>Al_2O_3$，长石多为碱性长石（钾钠长石），似长石族矿物常见。暗色矿物则出现霓石、霓辉石、钠闪石等。这些矿物只在碱性岩中才见到。而钙碱性系列的岩石，在化学成分上是 $CaO+Na_2O+K_2O>Al_2O_3>K_2O+Na_2O$，斜长石（钙钠长石）与碱性长石（钾钠长石）可同时存在，仅在较酸性的岩石中，才有较多的碱性长石，无似长石及碱性暗色矿物，而是普通辉石、透辉石、斜方辉石、普通角闪石之类。

此外矿物共生组合与挥发分有关，如在酸性岩中挥发含量多，除了形成云母之外，还可形成一些富含挥发分的矿物如电气石、黄玉、萤石等，而超基性—基性岩中挥发分的影响就不显著。在喷出岩中由于挥发分的大量散失，故富含挥发分的矿物难以形成，如角闪石、黑云母在喷出岩的基质中不出现，作为斑晶也多不稳定。

2.3 火成岩的结构与构造

2.3.1 概述

事物发展变化除了内在因素外，外因又是一个引起变化的条件。岩浆在结晶过程中，由于生成环境的不同，形成的岩石外貌特征表现也极不一致。岩石的外貌特征，就是指岩石的结构构造，也是鉴定岩石的根据之一。例如花岗岩与流纹岩，两者都是由石英、正长石、酸性斜长石所组成，矿物成分虽然相同，但生成环境不同，岩石外貌则完全不一样。

①结构，指组成岩石成分（包括晶质体与非晶质体）的结晶程度、颗粒大小、自形程度以及矿物颗粒之间的相互关系等方面。岩石结构的特征是受结晶速度与矿物结晶顺序的控制，而结晶速度与结晶顺序又取决于岩浆的温度、成分、气体的含量及粘性等，同时还取决于岩浆在冷凝时所处的压力环境。

②构造，构造是不同矿物集合体之间在空间上的排列或充填方式。构造的表现除受岩浆本身特性影响之外，亦受各地质条件的控制。

2.3.2 火成岩的结构

（1）结晶程度

根据岩石结晶质部分和非结晶质部分（玻璃质）的含量比例，可分为三类。

全晶质结构　岩石全部由矿物晶体所组成，为深成岩及部分浅成岩所具有的结构。例如花岗岩（图 3.2.3 中 *A*），肉眼和显微镜均能识别晶体。

玻璃质结构　全部由玻璃质所组成，亦称火山玻璃，如黑曜岩（图 3.2.3 中 *C*），看不出任何晶粒，具贝壳状断口、玻璃光泽、性脆。酸性喷出岩常具此种结构。

半晶质结构　岩石中既有矿物晶体，又有玻璃质的存在（图 3.2.3 中 *B*）。

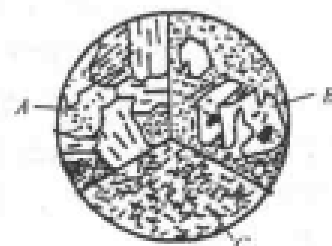


图 3.2.3　按结晶程度分三种结构
A—全晶质结构（花岗岩）
B—半晶质结构（流纹岩有石英斑晶）
C—玻璃质结构（黑曜岩有雏晶）

火山玻璃是不稳定的，随着时间的增长自然地发生去玻璃化作用而形成晶体。在温度和压力升高的条件下，这种转

化更为迅速。最初阶段在玻璃质中出现一些颗粒极微细的生成物，称为雏晶，形态呈毛发状、羽毛状、球状或棒状，在正交偏光下无光性反应，我国张家口以及闽浙一带白垩系酸性火山玻璃中就见有雏晶。再进一步结晶形成微晶，在显微镜下能看出一定的晶形轮廓，在正交偏光下有光性反应。

玻璃质结构是当岩浆喷出地表或侵入地壳浅处，由于冷却过快和粘性较大，以致妨碍离子迁移所造成的。富含 SiO_2 和碱质的岩浆，比那些含 SiO_2 低而富铁、镁、钙的岩浆粘性大。因此大量玻璃质在流纹岩、英安岩、粗面岩之类的喷出岩中比在玄武岩中更为常见。

(2)结晶颗粒的大小(粒度)

根据肉眼辨认颗粒的程度，按矿物颗粒的大小可以分为两类：

显晶质结构 组成岩石的矿物颗粒可以用肉眼(或借助于放大镜)区分颗粒，根据颗粒的绝对大小又可分为(供参考)：

极粗粒结构　晶体直径＞10mm

粗粒结构　晶体直径 5～10mm

中粒结构　晶体直径 2～5mm

细粒结构　晶体直径 0.2～2mm

微粒结构　晶体直径＜0.2mm

应注意的是，颗粒绝对大小划分标准极不一致，所列等级只供参考。组成岩石的矿物由于其成分与内部构造不同，因此不同矿物的大小当然不一。这里所指的大小，是指同种主要矿物的平均大小而言。

隐晶质结构 组成岩石的矿物颗粒很细，肉眼无法辨别，岩石外貌很致密，具瓷瓦状断口。与玻璃质的区别是没有玻璃光泽和贝壳状断口。

结晶颗粒的大小决定于岩浆冷却速度和挥发组分的含量。当岩浆冷却缓慢时，其中挥发分也不易散失，有利于晶体生长，形成粗粒结构，绝大部分深成岩都是这样。对极粗粒的伟晶岩来说，是因为岩浆中挥发分高度富集，岩浆的粘度也很小，有利于物质质点的运动，因而可以发育成巨大的晶体。细粒与隐晶质结构的岩石，是因为岩浆凝固迅速和挥发分散失很快的缘故，喷出岩和浅成的小型侵入体就是这样。

应当注意的是，绝对不能认为粗粒火成岩一定是深成的，细粒的就一定是喷出岩。如有些深成岩体边缘部分，虽没有玻璃质，但可形成隐晶质。因为边缘部分系岩浆遇到冷的围岩骤然冷却之故。厚的熔流岩虽然外壳与底部主要由玻璃质组成，但中心部分可能很粗。



图 3.2.4　根据颗粒大小命名结构类型

A—等粒结构；B—似斑状结构；C—斑状结构；D—不等粒结构

根据颗粒的相对大小又可分为三种类型(图 3.2.4)：

等粒结构 岩石中同种主要造岩矿物颗粒大小大致相等。

不等粒结构 同种造岩矿物大小不等，其粒度逐渐变小。它反映岩浆冷却过程中，环境不太稳定。

斑状结构及似斑状结构 岩石中颗粒大小相差很大，没有中等大小的颗粒，可与不等粒结构区别。粗的叫斑晶，小的叫基质，斑晶的自形程度高，基质包围着斑晶。斑状结构与似斑状结构的区别是根据基质的结晶程度与颗粒大小来分。如基质为隐晶质或玻璃质，则称斑状结构，基质为显晶质称似斑状结构。

斑状结构是浅成岩与喷出岩的特征，它反映了岩浆在冷凝过程中有两个不同的阶段。岩

浆在地壳深处开始结晶，能发育成大的晶体(斑晶)。在它凝固之前侵入地壳浅处或喷出地表，于是残余熔体受到骤然冷却而急速凝固，就形成较细粒的甚至是玻璃质的基质。由于斑晶与基质是两种不同物理化学条件下的产物，因而斑晶往往被熔蚀成港湾状，如石英斑岩中的石英斑晶，或被分解转变为新的矿物，如黑云母、角闪石斑晶周围形成的暗化边。又如黑云母、角闪石只能在斑晶中找到，在基质中不见，斜长石的斑晶较基质中的基性程度高。

似斑状结构主要分布在浅成岩及部分深成岩中，基质为全晶质粒状结构。斑晶与基质是差不多同时结晶，因而斑晶的边缘就不平整，往往被基质中的颗粒所穿插。一般认为，这种结构的产生是因为岩浆中某种成分含量过多而先开始结晶，但亦有现象表明，似斑状结构可能与交代作用有关。

(3)颗粒的外形

按在全晶质的岩石中，各矿物本身所特有的晶体形态发育的完整程度，可以分为三个类型(图3.2.5)。



图 3.2.5 按晶体的自形程度命名结构类型
A—自形晶结构(橄榄石)；
B—半自形晶结构(辉石及斜长石)；
C—他形晶结构(长石及石英)

自形晶 晶体的晶面发育完全，颗粒完全被晶面所包围，在岩石薄片中可见到呈规则的多边形外形，称自形晶，当岩石中主要矿物呈自形晶，此岩石称全自形晶结构。

他形晶 矿物颗粒无一完整的晶面，切面中外形轮廓很不规则。这种结构在细晶岩中极为明显，为典型的他形晶结构，故又称细晶结构或砂糖状结构。

半自形晶 矿物颗粒部分被晶面所包围，另一部分则呈现不规则的轮廓。

晶体外形的完整程度，一般取决于它在结晶次序中的先后。早期晶出的自形程度较高，晶出晚则呈他形晶，但是必须注意的是，早期形成的矿物被残余岩浆熔蚀成港湾形，或边缘被另一矿物所交代，这样先析出的晶体亦可呈他形晶。又如伟晶岩中的黑色电气石结晶晚于长石，但由于它的结晶能力较强，自形程度反而比钾长石高。另外我们还应当注意，在观察薄片时，不同方向的切片，同一种矿物的自形程度也会表现不一。

关于火成岩中矿物结晶顺序，通常根据以下四个方面来判断(也常有许多例外的情况)，见图 3.2.6、图 3.2.7。

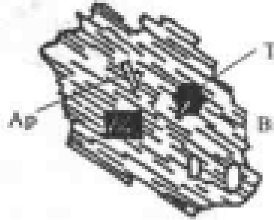


图 3.2.6 花岗闪长岩中矿物的包裹关系
Ap—磷灰石(结晶较早)；
Bi—黑云母； T—磁铁矿

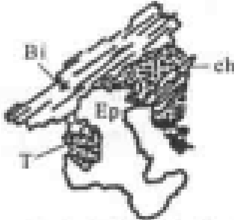


图 3.2.7 原生矿物与次生矿物的关系
Ep—绿帘石(次生)； ch—绿泥石(次生)；
Bi—黑云母(原生)； T—磁铁矿(次生)

第一，包裹关系：某矿物被另一矿物包裹，则被包裹的矿物先结晶。若次生矿物被包裹，但仍是后来形成的。通常含钙多的斜长石比钠长石先结晶，因此在斜长石晶体中心含钙长石分

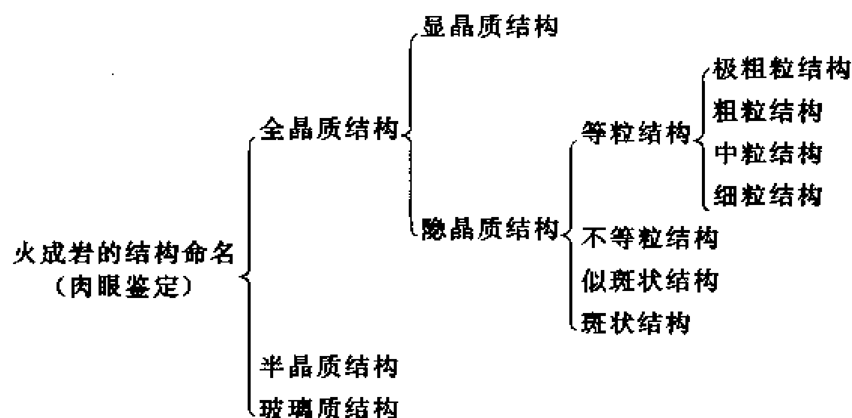
子较多。但也有反常现象，在单个斜长石晶体外围钙长石分子增高，这可能是岩浆同化了钙质围岸，因而岩浆中钙的含量增高，先形成的斜长石晶体与岩浆再起作用，因而在斜长石晶体外围钙长石分子增加，形成了基性斜长石包裹了酸性斜长石。

第二，互相穿插关系：插入或填充于其他矿物的裂隙中的矿物形成较晚。

第三，自形程度：早形成的晶体一般为自形晶，或者至少比稍晚形成的矿物更趋于自形。

第四，晶体的大小：大晶体一般是早开始结晶，例如斑状结构中的斑晶就先形成。

小结：综合以上三个方面对岩石结构的分析，肉眼鉴定时关于岩石结构命名归纳如下：



在分析岩石结构时，要善于抓住主要方面。肉眼鉴定时，应从粒度开始，这可分为三种情况：

①显晶质的粒状结构岩石，根据颗粒绝对大小划分极粗粒、粗粒、中粒、细粒、微粒，对中、粗粒的岩石可以再进一步考虑主要矿物自形程度，如主要矿物大部分为自形晶时，可叫自形粒状结构，但一般肉眼鉴定可以不考虑。

②矿物粒度大小不相等的岩石，可分为斑状结构、似斑状结构、不等粒结构。

观察内容包括斑晶大小、含量、成分、形态，基质的结晶程度（显晶质、隐晶质还是玻璃质）。

③具致密块状肉眼分不清颗粒的岩石，对岩石结构从两方面考虑：

隐晶质结构　岩石外表显瓷瓦状断口，岩石中矿物颗粒很细，肉眼无法辨认。无玻璃光泽和贝壳状断口，性能不脆。

玻璃质结构　外表显贝壳状断口，具玻璃光泽，性脆。

(4)矿物颗粒之间的相互结构关系

这里是指颗粒的形状及其连生方式。这种颗粒相互之间如何生长的关系，一般需要在显微镜下观察才能确定。我们仅介绍常见的几种结构形式：

①花岗状结构(图 3.2.8)　岩石中同种主要矿物大小大致相等，在晶体的自形程度上，暗色矿物自形晶发育程度较浅色矿物好，在浅色矿物中，斜长石较钾长石自形程度高，石英为他形晶。是花岗岩与花岗闪长岩所具有的一种结构。

②文象结构(图 3.2.9)　在花岗岩、花岗伟晶岩和花岗斑岩中常见。石英与碱性长石共结生长成连晶。石英通常成楔形，穿插在一个大长石晶体中。像古代的象形文字一样，故名文象结构。如果这种连生只有显微镜下才能见到时，称显微文象结构。这种结构是两种共结混合物（长石与石英）同时结晶的结果。

③辉绿结构　基性浅成岩及喷出岩中常见。斜长石与辉石的颗粒大小相近，但斜长石先结晶，自形程度比辉石好，故可看到由板条状的斜长石晶体所构成的孔隙中，充填有辉石颗粒。

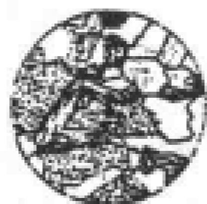


图 3.2.8　花岗状结构(花岗闪长岩)

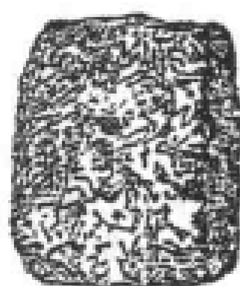


图 3.2.9　文象伟晶岩(手标本)

④反应结构(图 3.2.10 及图 3.2.11)　岩浆中早期结晶出的矿物，与剩余岩浆作用形成新的矿物。当作用进行不彻底时，先形成的矿物仍可保留，被新矿物所包围着，此称反应结构。反应结构需要在显微镜下观察，它又可分为：

反应边结构(图 3.2.10)　见于暗色矿物中，如早期形成的橄榄石被后形成的辉石或角闪石包围。

环带结构(图 3.2.11)　见于斜长石中，中长石中更为发育，中心部分为较基性的斜长石，向外变为较酸性的斜长石。



图 3.2.10　橄榄石的反应边结构

01—橄榄石；P_2—辉石；h_1—角闪石；P_1—斜长石



图 3.2.11　斜长石中的环带结构

3. 火成岩的构造

指火成岩中矿物集合之间的相互关系(排列方式与充填方式)，但这里不包括火成岩中的原生节理构造。常见构造类型有以下几种：

①块状构造

侵入岩中最常见，各种造岩矿物分布均匀而无方向性。

②斑杂构造(图 3.2.12)

岩石中各组成部分在结构上、矿物成分上或颜色上分布不均，像团块状似的，一般在岩体的边缘常见。引起斑杂构造的原因很多，如火成岩中含有围岩的捕虏体形成斑杂结构，有时是由于不均匀的同化混染形成斑杂构造，或由于岩浆的多次侵入而成。

③条带状构造(图 3.2.13)

主要见于超基性和基性岩中，岩石中不同成分的矿物组成相间的条带。如辉长岩中常见到深色矿物辉石和橄榄石与浅色斜长石组成黑白相间的条带等。

④流纹构造

由岩石的基质中不同颜色的条纹和拉长的气孔所组成，这系粘性较大的熔岩在流动过程



图 3.2.12　斑杂构造

含黑云母、角闪石较富的部分(黑色)呈不均匀分布，构成斑杂构造，同时具定向构造



图 3.2.13　条带状构造

细小铬铁矿晶体在蛇纹岩体中呈条带状密集

中所产生，为流纹岩的典型构造。

⑤流线及流面构造(图 3.2.14)

火成岩中片状、板状以及扁平的析离体、捕虏体的平行排列，形成流面，柱状矿物和析离体、捕虏体的延长方向成定向排列，形成流线。流面和流线系岩浆流动构造之一，一般发育在大侵入体的边缘和小侵入体中，大致平行于围岩的接触面。它的存在显示了岩浆流动方向。在某些矿区，根据流动构造分析岩浆流动前锋(缘)所在位置，从而找到金属元素的富集地段，同时利用流面可测定岩体接触面的产状。

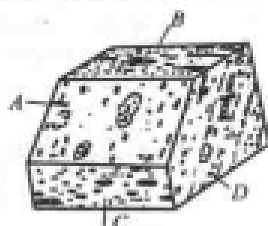


图 3.2.14　流线及流面构造

A—平行流面构造的面含有柱状、针状、片状矿物及包裹体的团块；B—水平面；C—平行流面走向的纵切面；D—垂直流面走向的横切面



图 3.2.15　枕状熔岩

⑥气孔及杏仁状构造

在喷出岩中有许多浑圆形或椭圆形孔洞，这种多孔性叫气孔构造，在玄武岩中最发育，故亦称它为气孔状玄武岩。气孔是岩浆在冷凝时，由于气体物质逸出而形成许多大小不等的孔洞。气孔的拉长方向表示岩浆的流动方向。

若岩石孔洞被后来次生矿物(方解石、玉髓、蛋白石)所填充，形如杏仁，则称杏仁状构造。

⑦枕状构造(图 3.2.15)

海底喷发的基性岩多具有这种构造，整块的岩石被分割成一个个椭球，样子很像枕头似的，或粗的砾状岩，称为球状或枕状熔岩，其形成原因一般都用液体的球状习性来解释，在海底喷发时溢出的熔岩，仿佛被分成一滴一滴似的，每一滴都被一层蒸气所包住，这样在水底滚动，凝结后就形成了球状熔岩流。

2.4　火成岩的分类

自然界中火成岩的种类繁多，就目前所知不下六、七百种。由于它们都是岩浆作用的产物，因此各种岩石之间就有一定的内在联系。虽然各有其特点，但也有许多相似之处。为了较易于了解火成岩的形成及其变化规律，便于对资料分析研究以利找矿勘探工作，同时也是工业利用的基础，因此对火成岩进行比较系统的分类是完全必要的。同时对初学者来说，经过分类

归纳，亦有助于记忆与掌握。

火成岩分类的依据是从它本身所具有的基本特征出发，尽量减少人为因素，使之尽可能地符合客观实际。分类依据有四个方面：化学成分、矿物成分、结构与构造、产状。

到目前为止，对火成岩的分类还未尽完善，但随着人们认识自然的逐步深入，问题是可以解决的。

2.4.1 分类的基本依据

(1)化学成分分类

根据岩石中化学成分的特点来分，主要考虑几种氧化物的含量。

①根据 SiO_2 的含量及饱和程度来划分，见表 3.2.3。这种分类在野外可根据某些矿物在岩石中的出现及含量来判断其酸度。当有过多的石英出现时，说明有较多的游离 SiO_2，应属 SiO_2 过饱和岩石；如出现橄榄石及似长石族矿物，说明 SiO_2 不足，属 SiO_2 不饱和的岩石；若岩石中的石英、橄榄石、似长石族矿物均未出现，为 SiO_2 饱和的岩石。

表 3.2.3 主要火成岩分类及肉眼鉴定表

<table>
<tr><td colspan="4" rowspan="5">颜色(色率)
浅色矿物
暗色矿物
结构构造
产状</td><td>肉红、灰
(10%~20%)</td><td>肉红、灰
(10%~20%)</td><td>肉红、灰白、浅黄白
(0~10%)</td><td>浅灰、灰
(10%~30%)</td><td>绿灰、灰
(30%~50%)</td><td>黑、灰黑、灰
(50%~90%)</td><td>绿黑、黑
(90%~100%)</td></tr>
<tr><td colspan="6">含　有　长　石</td><td rowspan="2">无长石或极少</td></tr>
<tr><td>碱性长石、似长石</td><td>碱性长石</td><td>钾长石多于斜长石</td><td>斜长石多于钾长石</td><td>中性斜长石为主</td><td>基性斜长石为主</td></tr>
<tr><td colspan="2">无　石　英</td><td>石英占
25%以上</td><td>石英占
20%左右</td><td>无石英
(或极少)</td><td colspan="2">无石英</td></tr>
<tr><td>碱性辉石
碱性角闪石</td><td>角闪石
黑云母
(辉　石)</td><td>黑云母
(角闪石)</td><td>黑云母
角闪石</td><td>角闪石
(黑云母)
(辉　石)</td><td>辉　石
(角闪石)
(黑云母)</td><td>橄榄石
辉　石
(角闪石)</td></tr>
<tr><td>深成岩</td><td>岩基岩株岩盘</td><td colspan="2">全晶质等粒结构
块状构造
局部具斑杂及流纹构造</td><td>霞石正长岩
流霞正长岩</td><td>正长岩</td><td>花岗岩</td><td>花岗闪长岩</td><td>闪长岩</td><td>辉长岩
斜长岩</td><td>纯橄榄石
橄榄岩
辉石岩
(角闪岩)</td></tr>
<tr><td>浅成岩</td><td>岩墙或小侵入体</td><td colspan="2">细粒及斑状结构</td><td>霞石正长斑岩</td><td>正长斑岩</td><td>花岗斑岩
石英斑岩</td><td>花岗闪长斑岩</td><td>闪长玢岩
细晶闪长岩</td><td>辉长玢岩
辉绿岩
细晶辉长岩</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">喷出岩</td><td rowspan="3">岩钟、岩被、岩流</td><td colspan="2">斑状结构
半晶质结构
玻璃质结构</td><td>响岩</td><td>粗面石</td><td>石英斑岩
流纹岩
火山玻璃质岩</td><td>英安岩</td><td>安山石</td><td>玄武岩</td><td>苦橄岩</td></tr>
<tr><td rowspan="2">鉴定要求</td><td>斑晶</td><td>白榴石(假白榴石)、透长石</td><td>透长石(斜长石)、黑云母角闪石</td><td>透长石
石英</td><td>斜长石、石英(角闪石)、(黑云母)</td><td>角闪石
斜长石</td><td>橄榄石、斜长石、辉石</td><td></td></tr>
<tr><td>基质</td><td>隐晶质、半晶质、浅灰、深灰、灰黑</td><td>隐晶质、半晶质、浅灰、灰、灰紫</td><td>隐晶质、半晶质、玻璃质、粉红、浅灰、灰紫色(玻璃质常显紫、绿黑、黑色)等流纹构造</td><td>隐晶质、半晶质、灰绿、灰紫、紫红</td><td>隐晶质、灰紫、紫红、灰绿。气孔、杏仁构造</td><td>隐晶质、绿黑色、灰黑、黑色。气孔、杏仁状构造</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="3">SiO_2 的含量</td><td>52%~65%</td><td>52%~65%</td><td colspan="2">60%~75%</td><td>52%~65%</td><td>45%~52%</td><td>45%以下</td></tr>
<tr><td rowspan="2">SiO_2 不饱和岩石</td><td rowspan="2">SiO_2 饱和岩石</td><td colspan="2">SiO_2 过饱和岩石</td><td rowspan="2">中性岩类</td><td rowspan="2">基性岩类</td><td rowspan="2">超基性岩类</td></tr>
<tr><td>酸性岩类</td><td>过渡类型</td></tr>
<tr><td colspan="4">系　列</td><td colspan="3">碱性岩系列</td><td colspan="4">钙碱性岩系列</td></tr>
</table>

②根据岩浆岩中K_2O、Na_2O、Al_2O_3、CaO的相对含量，一般划分三个类型。

正常类型　$Na_2O+K_2O<Al_2O<Na_2O+K_2O+CaO$

铝过饱和类型　$Al_2O_3>CaO+Na_2O+K_2O$

碱过饱和类型　$Na_2O+K_2O>Al_2O_3$

此种分类能准确地反映岩石的化学成分的特点及各类岩石之间化学成分的变化规律，对区分隐晶质及玻璃质岩石比较适合。但这种分类法存在着分析成本过高，对相同成分不同产状的岩石则不能确切地划分等缺点。

(2)矿物成分的分类

根据火成岩中所含矿物成分的特点，对火成岩的分类略述如下：

①按岩石中主要矿物和次要矿物的划分进行分类　火成岩中的主要矿物有石英、长石、似长石以及铁镁矿物，根据矿物的共生组合划分出不同的岩类。例如超基性岩以铁镁矿物为主，基性岩则出现基性斜长石与辉石的组合，中性岩则是由角闪石与中性斜长石组成，花岗岩则含石英与长石(钾长石与酸性斜长石)等。由于岩矿鉴定的深入，光从矿物定性上来分类，还不能解决划分过渡性的岩石，因而进一步从矿物成分的含量上分出了主要矿物和次要矿物，从而可以详细地划分出岩石种属。如闪长岩向花岗岩过渡类型中就分出了石英闪长岩、花岗闪长岩等。

②根据岩石中碱和碱土金属矿物的出现及含量分类　火成岩中，由于碱金属(K_2O及Na_2O)和碱土金属(CaO)含量的变化，因而引起不同的矿物共生组合，于是又可将各类岩石分为两个系列：

碱性系列　在矿物中，长石多为碱性长石(正长石、歪长石、钠长石)。似长石族矿物常见，一般出现在SiO_2不饱和的岩石中。暗色矿物中出现含钠的辉石(霓石、霓辉石)和富钠的闪石(钠闪石、棕闪石、钠钙闪石)。本类岩石中基性斜长石可与碱性长石共生，石英出现于最酸性的岩石中。

钙碱性系列　只有在较酸性岩石中才有碱性长石，基性岩中基性斜长石一般不与碱性长石共生，斜长石是普遍存在的矿物，且环带构造很普遍。无似长石族矿物、碱性辉石及碱性角闪石等。

此外，矿物分类法还根据暗色矿物与浅色矿含量的比例，将岩石划分为浅色岩(酸性岩)、中色岩(中性岩)、暗色岩(基性—超基性岩)。

根据组成岩石的矿物种类的多少可分为单矿物岩(主要由一种矿物所组成，如纯橄榄岩、斜长岩等)、复矿物岩(由两种或两种以上矿物所组成，如辉长岩、花岗岩)。

按矿物成分进行分类有很多优点，主要矿物一般肉眼均能辨认，适合于野外和室内鉴定。同时，矿物成分的变化也反映化学成分的特点和部分地反映火成岩的结晶历史，但是对隐晶质和玻璃质岩石则无法进行分类，对有的岩石也难以划分，如花岗岩与花岗斑岩，二者同是由钾长石、石英、黑云母所组成，只是成因不同。

(3)地质产状分类

这种分类是根据岩浆在地壳中冷凝时所处的位置，把火成岩分为深成岩、浅成岩、喷出岩三类。

2.4.2　本教材所采用的分类法

综上所述，对火成岩的分类必须从它本身所固有的特点出发，我们采用以矿物成分为基

础，结合化学成分、产状等原则进行概要地分类，详见火成岩分类及肉眼鉴定表。现说明几点：

①碱性系列中只列入常见的碱性岩。

②对喷出岩强调斑晶和基质的成分，故单独作为鉴定要素列出。

③表中所列仅为主要岩族，具体种属和少见的岩种均未列入。

④脉岩具有它的特殊性，故未列入表中，在火成岩各论中将单独进行讨论。

⑤矿物成分中标有( )者为次要成分。

3 火成岩各论

3.1 橄榄岩—苦橄岩类(超基性岩类)

3.1.1 一般特征

本类岩石无论是深成的侵入岩还是喷出的火山岩，其在化学成分上的特点是：SiO_2 含量很低，一般很少超过 45%，它们是硅酸不饱和的岩石。习惯上称之为超基性岩。Al_2O_3 含量也低(1%～6%)，Na_2O 和 K_2O 含量极少，一般均<1%，MgO 和 FeO 含量则很高。FeO+Fe_2O_3 可达 10%，MgO 可达 40%。

矿物成分上，其特点是铁镁矿物占绝对多数，主要为橄榄石、辉石，其次是角闪石和黑云母。一般不含硅铝矿物，若含有基性斜长石，最多不超过 15%，石英极少出现，不透明金属矿物常见。

另外，本类岩石颜色深、比密度大，多产于厚的岩床、岩盆和岩流的底部，且向上可过渡为基性岩类，于褶皱带和断裂带中也可有独立的超基性岩体。在地表出露不多，据统计只占岩浆岩总面积的 0.4%。与铬、镍、钴、铂及金刚石等矿床有密切关系。另外，本类岩石往往遭受变化，出现一些蛇纹石、滑石、绿泥石等次生矿物，从而改变岩石的性质。

本类岩石的深成侵入岩为橄榄岩、辉岩，浅成的侵入岩为苦橄玢岩，喷出的火山岩为苦橄岩。

本类岩石按 SiO_2 的含量称为超基性岩，按铁、镁矿物的含量亦称超镁铁岩(镁铁矿物>90%)。实际上多数超基性岩也确是超镁铁岩，但少数的辉石如透辉石等，SiO_2 的含量大于45%，就不能称为超基性岩，因此有人建议不用超基性岩这一名称，而改用超镁铁岩类更为适合。

3.1.2 主要种属描述

1. 纯橄榄岩

是一种几乎全部(95%以上)由橄榄石(镁橄榄石和贵橄榄石)所组成，可含有少量辉石(顽辉石、方铜辉石)以及铬铁矿、磁铁矿、钛铁矿、磁黄铁矿、自然铂等。新鲜的纯橄榄岩呈橄榄绿、黄绿或浅绿灰色，细粒-粗粒的粒状结构，块状构造。

纯橄榄岩少见，通常多遭受不同程度的蛇纹石化，甚至橄榄石全部被蛇纹石交代而变成蛇纹岩。蛇纹石化纯橄榄岩呈暗绿色，致密块状，具油脂感，比密度较轻。

2. 橄榄岩

与纯橄榄岩近似，其主要矿物亦为橄榄石(40%～70%)，还含相当数量的辉石(斜方辉石和单斜辉石)，以及少量角闪石、黑云母、磁铁矿、铬铁矿、尖晶石等。新鲜的橄榄岩多呈浅绿色，但一般多因蛇纹石化而呈暗褐、暗绿，有时近乎黑色，中粒至粗粒结构。同时，橄榄岩中可含有蛇纹石、滑石、纤维状角闪石和碳酸盐等蚀变矿物。

橄榄岩可根据其中所含辉石种类不同分为：

斜辉橄榄岩：主要由橄榄石和斜方辉石（顽火辉石或古铜辉石）组成。

异剥橄榄岩：主要由橄榄石和异剥辉石组成。

二辉橄榄岩：除橄榄石外，还含有单斜辉石和斜方辉石。

3. 辉石岩

矿物成分几乎全由辉石（95%～100%）组成，含少量橄榄石、角闪石、黑云母、铬铁矿、磁铁矿、钛铁矿等。颜色深，呈黑、棕灰、淡紫等色，中至粗粒的粒状结构。

辉石易蚀变成纤维状蛇纹石，这种蛇纹石变种称绢石，肉眼观察呈灰黄色及强烈的丝绢光泽。

根据辉石种属不同可细分为：斜方辉石岩（由斜方辉石组成）、单斜辉石岩（由单斜辉石组成）、二辉石岩（由斜方辉石和单斜辉石组成）、橄榄辉石岩（含橄榄石 5%～25%的辉石岩）。

以上所述，均为深成岩，因超基性的喷出岩很少见，故不作介绍。

3.1.3 有关矿产和工业用途

在超基性岩中常伴生有铂、铬铁矿、镍钴矿、钒钛磁铁矿、磷灰石以及金刚石等矿产，另外，超镁铁岩变化后可形成石棉、滑石、蛇纹石、金云母、菱镁矿等非金属矿产。就是普通的超镁铁岩也可以作钙镁磷肥的原料来使用。

某些高镁质的橄榄岩和蛇纹岩可做耐火材料。此外，由于超基性岩性脆、易变化、抗风化性能差、有透水性，不应作为水文工程设施的材料。

陶瓷工业中，镁橄榄岩可作为镁质瓷原料，铁橄榄岩可作色料的原料。

3.2 辉长岩—玄武岩类(基性岩类)

3.2.1 一般特征

本类岩石在化学成分上和超基性岩比较有明显的差别，其中 SiO_2 含量为 45%～52%，比超基性岩稍高，但仍低于其他岩类。Al_2O_3 比超基性岩有较大的增加，可达 14%，CaO 也明显增多了，可达 9%。MgO 和 FeO 减少了许多，但仍高于中性岩。Na_2O、K_2O 仍然很少，但玄武岩中比辉长岩中要多一些，特别是 K_2O 比辉岩中要多一些。习惯上称它们为基性岩（钙碱性基性岩）。如果其中的 Na_2O 和 K_2O 较高时即组成了碱性基性岩。

在矿物成分上和超基性岩不同的是可有大量的铝硅酸盐矿物，以基性斜长石为主，有时还有少量的钾长石和石英。但是镁铁矿物仍然不少，一般约占全岩的 40%左右，故它们又可叫做镁铁岩类，以辉石为主，橄榄石、角闪石、黑云母次之。当其中出现碱性辉石和碱性角闪石以及中性斜长石与碱性长石和似长石时，即过渡为碱性基性岩类，但其分布较少。

本类岩石的颜色较深，但比超基性岩要浅些。在地表分布的特点是喷出岩分布很广，是喷出岩分布最广的一种。而侵入岩则分布较少，基性岩常与超基性岩共生，两者在一个岩体中可以互相过渡，基性岩类有时也成独立的岩体出现。

基性岩中的矿物遭受变化时，辉石多半变成绿泥石，斜长石变为绿帘石（一种黄绿色粒状矿物）。

最常见的侵入岩为辉长岩(深成)、辉绿岩(浅成),喷出的火山岩则是玄武岩。

3.2.2 主要种属描述

1. 辉长岩

是基性岩类深成侵入岩的代表。矿物成分主要是由辉石(普通辉石、异剥石、透辉石等)和斜长石(拉长石)等组成。其次是少量的橄榄石、角闪石、黑云母、钾长石、石英、磁铁矿、磷灰石、钛铁矿,岩石中的铁镁矿物一般占30%～60%。绿色中常带有灰黑色,往往在灰白色的基础上(由斜长石构成)出现一些褐色或暗褐色斑点(由辉石构成),辉石含量多时,颜色就深一些,最常见的结构是辉长结构(辉长结构即为:岩石中辉石和斜长石的自形程度几乎相等,通常成等粒半自形—他形晶,颗粒相间分布,辉长结构是辉石和斜长石同时从岩浆中析出的结果),块状构造,有时呈条带状构造(是由以辉石为主的深色条带和以斜长石为主的浅色条带构成)。

斜长石常呈长薄板状,具有平整的解理面,有时可看到斜长石常有的聚片双晶细线。辉石往往呈现它常有的褐绿色短柱粒状,并且常可见到像阶梯一样的解理面。

辉长岩易发生纤闪石化和钠黝帘石化。所谓纤闪石化是辉石被纤维状绿色角闪石所代替。钠黝帘石化是辉石被纤维状角闪石代替的同时,斜长石被"钠黝帘石"所代替。所谓"钠黝帘石"就是钠长石常常代替了整个基性斜长石的晶形,而其中经常包括有黝帘石、绿帘石、绢云母和葡萄石等。

2. 辉绿岩

是基性岩类浅成侵入岩的代表,分布很广,矿物成分与辉长岩相当,主要由斜长石(拉长石)和辉石(单斜辉石)组成。与辉长岩所不同的是其结构上有差别,一般具有斑状结构、间粒结构、辉绿结构、辉长辉绿结构。将风化比较深的岩石加水湿润后,肉眼能看到辉绿结构(即在白色或微带绿色的细长柱状或板状长石晶体所组成的三角形空隙中,充填着绿黑色的辉石或其他铁镁矿物颗粒)。

新鲜的辉绿岩颜色多为深灰或黑色,受风化后颜色一般呈浅绿或绿灰色。

辉绿岩易发生蚀变,除了可发生钠黝帘石化和纤闪石化外,还常见辉石变成绿泥石和碳酸盐,析出氧化铁等,橄榄石变成蛇纹石以及斜长石变成绢云母、高岭土等。

3. 玄武岩

是基性岩类喷出岩的代表,其分布非常广泛,常形成巨厚的岩流和岩被。玄武岩的矿物成分相似于辉长岩,主要是由基性斜长石(拉长石或倍长石,有时也可有中长石、更长石,甚至还会有钠长石)和辉石组成,有少量橄榄石、磁铁矿和磷灰石。

由于玄武岩的生成环境不同,表现了不同的结构和构造,玄武岩喷出地表时,因冷却快,结晶的条件不好,所以呈致密隐晶质、半晶质或斑状结构,除斑状结构中的斑晶可辨认外,一般很难用肉眼辨认其中的矿物成分。斑晶中的矿物成分有针状的斜长石、暗绿色的辉石和绿色的橄榄石,玄武岩的构造常具气孔构造、杏仁构造,充填物是方解石、绿泥石、绿帘石、斜长石、蛋白石、玉髓和沸石等。如果是水下喷出的玄武岩则常呈枕状构造。

玄武岩颜色很深,多为黑色、暗褐色,风化后可呈暗红色或黑褐色以及暗绿色和绿色。

玄武岩在变质作用下可变成绿片岩和角闪岩,在表生作用影响下,玄武岩中的暗色矿物和浅色矿物会变得不稳定,橄榄石常变成褐红色的伊丁石,辉石变成绿泥石,斜长石变成粘土矿物。

3.2.3 有关矿产和工业用途

与基性侵入岩有关的金属矿产主要有钒钛磁铁矿和铜镍硫化物矿，前者产于辉长岩和斜长岩中，后者产于苏长岩中。和此两类矿产伴生的还有铂族元素，钴、金、银等有用组分，因之常可综合利用。新鲜的辉长岩、辉绿岩可以作建筑材料，斜长岩具变彩特征，是名贵的建筑石材，辉绿岩还可作为铸石的原料。

与玄武岩有关的矿产是冰洲石、玛瑙、自然铜矿和钴土矿，它们充填在玄武岩气孔中。玄武岩还是很好的铸石原料，用玄武岩制成的铸石产品具有强的耐酸、抗磨、抗压、绝缘性能。

陶瓷工业中，辉长岩和玄武岩可作为黑色颜料用的原料。

3.3 闪长岩—安山岩类(中性岩类)

3.3.1 一般特征

本类岩石 SiO_2 的含量为 52%～65%，较基性岩多，它们是硅酸饱和或弱过饱和的岩石，习惯上称为中性岩。FeO、Fe_2O_3、MgO 较基性岩低。CaO 也减少了，Al_2O_3 增到 16%～17%，Na_2O 和 K_2O 则明显比基性岩中要多些。

矿物成分上，镁铁矿物较基性岩少，约占 30%，主要为角闪石，其次为辉石和黑云母。铝硅酸盐矿物则增达 70%左右，其主要为中性斜长岩(中长石)，有时可有少量钾长石和石英。

岩石的颜色较基性岩浅，通常为浅灰绿色、灰白色。在分布上也类似基性岩类，即喷出岩多于侵入岩。在产状上它们可以分别向基性岩或酸性岩过渡，且常常共生在一起。岩石如果遭受变化，角闪石变成绿泥石，中长石变为绿帘石、绢云母。

常见的深成侵入岩为闪长岩，浅成侵入岩为长玢岩，喷出岩为安山岩。

3.3.2 主要种属描述

1. 闪长岩

为中性岩类的深成侵入岩的代表。主要矿物为中性斜长石(中长石和部分更长石)和普通角闪石，其次是单斜辉石和黑云母、石英、正长石，以及副矿物磷灰石、磁铁矿、钛铁矿和榍石。

全晶质，半自形晶，粗粒状结构，块状构造。颜色浅灰绿色，经常有黑色或深绿色斑点(角闪石)。

闪长岩中斜长石和角闪石在手标本上一般容易辨认。斜长石呈长条薄板状，晶形较好，新鲜的可见玻璃光泽较强，平整的解理面，有时可见到平行而密集的聚片双晶条纹。角闪石呈长柱状晶体。辉石也易识别，一般呈粗短状晶体。

闪长岩中石英含量小于 5%，石英闪长岩则石英含量为 5%～20%。此外，按闪长岩中所含铁镁矿物的性质又可分为：角闪闪长岩，其铁镁矿物主要是普遍角闪石，即为一般的闪长岩。辉石闪长岩，铁镁矿物为紫苏辉石或透辉石，没有或仅有少量的角闪石。黑云母闪长岩，铁镁矿物主要是黑云母。

闪长岩在热液和变质作用影响下，其中的铁镁矿物常形成绿泥石、绿帘石，假象纤闪石，斜长石则发生钠黝帘石化或绢云母化。此外，还可发生碳酸盐化、钠长石化、硅化以及方柱石化，

在表生作用下，斜长石则变成高岭土，角闪石变为绿泥石。

2. 闪长玢岩

是中性岩的浅成侵入岩的代表。矿物成分和闪长岩相似，结构为斑状结构，斑晶为灰白色板状斜长石和暗色的角闪石、辉石，基质为细粒状至隐晶质的斜长石和辉石。多呈脉状产出。

3. 安山岩

是中性岩类喷出岩的代表，安山岩的矿物成分基本上相似于闪长岩，但也有一些差异，主要矿物为斜长石和辉石，而角闪石和黑云母较少，一般成斑晶出现。在结构、构造上因生成环境与闪长岩不同而出现了不同的结构和构造。一般呈致密隐晶质，半晶质的斑状结构，具气孔状或流纹状构造，颜色为红褐色、浅褐色、浅红、灰绿或灰色，经变化后则多呈褐色、绿色及灰白色。

按安山岩中暗色矿物的不同可分为：

辉石安山岩：主要含辉石和斜长石斑晶，偶尔含少量（$<5\%$）橄榄石。

角闪安山岩：主要含角闪石和斜长石斑晶。

黑云母安山岩：主要含黑云母和斜长石斑晶。

橄榄安山岩：含有5%橄榄石斑晶和15%斜长石斑晶及少量普通辉石斑晶。

玄武安山岩：是玄武岩和安山岩之间的过渡成员。

粗面安山岩：是安山岩和粗面岩之间的过渡成员。

安山岩在含矿热液作用下，常发生青盘岩化，或称变安山岩化，青盘岩化的安山岩是一种绿色致密块状岩石，原来的暗色矿物多发生绿泥石化、绿帘石化和次闪石化，斜长石产生钠长石化、绢云母化、高岭土化及碳酸盐化等，原来的安山岩基质则变为由钠长石、石英、绿泥石、绿帘石和方解石组成的细粒集合体。

3.3.3 有关矿产和工业用途

与闪长岩有关的矿产，主要为矽卡岩型的铁矿和铜矿，这类矿床主要分布于闪长岩和碳酸岩相接触的接触带上。又因为闪长岩比辉长岩的稳定性要高些，抗风化能力强些，其压力强度为2400kg/cm^2，所以是很好的建筑材料。当其岩体较大时也可作为良好的水工建筑地基，如我国黄河三门峡填址即位于闪长岩组成的砥柱石上。

与安山岩有关的矿产主要是和青磐岩化相伴的金银矿床，其次也有黄铁矿型铜矿与黄铁矿床。安山岩的抗压强度为：1200～2400kg/cm^2，可作建筑材料和建陶工业坯用原料，而且也是天然的耐酸建筑材料。

3.4 花岗岩—流纹岩类和花岗闪长岩—英安岩类（酸性和中酸性岩类）

3.4.1 一般特征

本类岩石的化学成分特点是SiO_2含量高，超过65%，其中花岗闪长岩和英安岩类一般达65%～70%，花岗岩和流纹岩类则达70%以上，属于硅酸过饱和的岩石，因之习惯上将其称为中酸性岩和酸性岩。FeO、Fe_2O_3、MgO含量都较低，小于2%，但喷出岩的Fe_2O_3/FeO值则远远大于侵入岩，因此在喷出岩中Fe_2O_3有较高的含量，可大于2%。CaO含量比中性岩少，低于3%，Al_2O_3比中性岩略有降低，约12%～14%左右。Na_2O和K_2O则有明显的增多，平均

各约 3.5%。按含碱量的不同，可将本类岩石分为钙碱性和碱性两个系列，后者的碱含量要更高些，往往 $K_2O>Na_2O$。本教材着重对钙碱性系列岩石进行介绍。

在矿物成分上的特点是：硅铝矿物含量大于铁镁矿物含量。硅铝矿物可达 90%左右，以石英、酸性斜长石、碱性长石为主。在碱性系列中可有碱性辉石和碱性角闪石。铁镁矿物含量一般都在 5%～10%，主要是黑云母和角闪石，而辉石少见。

本类岩石的颜色一般很浅，常为浅灰红色，属于浅色岩。比密度小，由于酸性熔岩流粘度较大，因此在喷出岩中玻璃质常见。

本类岩石的侵入岩分布很广，几乎占所有岩浆岩的一半，而喷出岩则较小。花岗岩类岩石与许多金属、稀有金属、放射性元素矿床有关，也是主要的陶瓷原料。因此，在岩浆岩各类岩石中是最重要的一类。

此岩岩石的侵入岩为花岗岩和花岗闪长岩类，浅成侵入岩为花岗斑岩、花岗闪长斑岩，喷出岩则为流纹岩和英安岩类。

3.4.2 主要种属描述

1. 花岗岩

是酸性岩的深成侵入岩的主要代表，颜色为浅粉红色、肉红色、灰红色。全晶质中粒到粗粒、等粒结构或似斑状结构，块状构造。主要矿物成分是石英、碱性长石（钾长石）和少量酸性斜长石。次要矿物是黑云母（最多不超过 15%）、角闪石和辉石，副矿物有锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿、褐帘石、萤石等。显微镜下可见一般暗色矿物自形程度较高，其次是剑长石、碱性长石大多为半自形，而石英都呈他形晶（充填在其他矿物之间）。根据暗色矿物的种属不同可分为黑云母花岗岩、二云母花岗岩、角闪石花岗岩、云母角闪花岗岩等，不含暗色矿物的则称为白岗岩。其中以黑云母花岗岩分布最广，所以黑云母花岗岩又叫普通花岗岩。

2. 花岗闪长岩

是中酸性岩深成侵入岩的代表，是花岗岩类向闪长岩类过渡的中间成员，与花岗岩相比含有较少的碱性长石，斜长石（更长石-中长石）多于碱性长石，斜长石占岩石中长石总量的 65%以上，暗色矿物往往以角闪石为主，整个暗色矿物含量也较花岗岩多些，可达 15%，常见副矿物有磷灰石、磁铁矿、锆石、榍石等。

3. 花岗斑岩

是酸性岩浅成侵入岩的代表，矿物成分与花岗岩相似，所不同的只是生成环境接近地表，常呈斑状结构，斑晶为石英、钾长石和斜长石，有时也有黑云母或角闪石。基质一般呈微花岗粒状结构。如基质中的石英的长石呈显微文象结构，则称为花岗斑岩。花岗斑岩常形成小型岩体或为花岗岩体的边缘相。

4. 石英斑岩

亦是酸性岩浅成侵入岩，不过更接近于火山岩。也具斑状结构，但斑晶主要是石英，有时有透长石，基质则为隐晶质。

5. 花岗闪长斑岩

为中酸性岩浅成侵入岩的代表，其矿物成分与花岗闪长岩相当，具斑状结构，斑晶为斜长石和石英，有时有角闪石和辉石，基质为细粒的石英、斜长石和碱性长石。

以上花岗岩类岩石在汽化热液影响下则可以被交代，而发生钾长石化、钠长石化、云英岩

化和高岭土化，有时这几种变化可以相互叠加。花岗斑岩在热液作用下则可形成石英、绢云母与黄铁矿，构成黄铁绢英岩化。花岗岩在区域热动变质作用影响下，可以发生破碎，形成碎裂岩、糜棱岩、千糜岩或形成片麻岩。在表生作用下，花岗岩中长石变为高岭土和绢云母，黑云母变为绿泥石，而构成高岭土矿床，如江西景德镇、湖北大悟等地的高岭土矿属于此类。

6. 流纹岩

是相当于花岗岩成分的喷出岩，本类岩石颜色为灰色、粉红色。矿物成分和花岗岩成分基本相同，但也有一些差别，碱性长石多为无色透明的透长石或歪长石，斑晶中的石英多为受了熔蚀的柱面不发育的β-石英，同时基质中还可出现鳞石英或方石英、斜长石、黑云母，角闪石多呈斑晶出现。

流纹岩由于粘度较大(富含 SiO_2)，喷出地表时的结构和构造较之前述各种喷出岩有所不同，为斑状结构，斑晶主要为石英和透长石，有时有斜长石，基质一般为隐晶质或玻璃质。具流纹构造发育，气孔、杏仁构造较少。如果流纹岩中斑晶的含量＞30%，则称为斑流岩。

7. 英安岩

是成分与花岗闪长岩相当的喷出岩，通常具斑状结构，斑晶以斜长石(更—中长石)为主，也有少量的石英、黑云母、角闪石，基质除长英质外，还有少量斜长石微晶，通常为玻璃质，有时可见流纹构造。

流纹岩类岩石在区域变质作用影响下常可转变为变流纹岩、千枚岩和云母石英片岩。在应力影响下则变成糜棱岩、千糜岩和片岩。在热液作用下则常被交代成次生石英岩，即主要由石英(15%～70%)和一些富铝矿物(明矾石、叶蜡石、绢云母、红柱石、刚玉)组成的浅色细粒岩石，在表生作用下则可变成高岭土。

3.4.3 有关矿产和工业用途

有许多重要的金属矿产在空间上和成因上都与花岗岩类相关，如铁、铜、铅、锌、金、银、钨、钼、锡、铋、铍、汞、锑以及 Nb、Ta 等稀土和放射性矿产等。这些有用矿物或是伴生于花岗岩中，或是在岩体的边上形成矽卡岩矿床或伟晶岩矿床或热液矿床。有些风化型的高岭土矿和稀土矿则直接是由花岗岩变化来的。

花岗岩类岩石本身也是有价值的建筑材料，它既美观又抗压强度高，如天安门前人民英雄纪念碑就是选用优质的青岛花岗岩建成的，南京的中山陵则是选用福建的淡绿色花岗岩建成的。适宜的花岗岩基还可以作为地下工程和水电工程的设施地基和油田盆地的基底。

蚀变的酸性喷出岩中，可形成一些金属和非金属矿床。金属矿产有：铜矿、铁矿、铅锌汞铀矿、黄铁矿。非金属矿床有：高岭石、明矾石、沸石、叶蜡石、刚玉等。

流纹岩可用作建筑材料，板脂岩、珍珠岩加工后是一种良好的轻质建筑材料。浮石的碎块或砂可用作轻混凝土的骨料，是具有隔热、隔音性能的建筑材料。

3.5 正长岩—粗面岩类(中性岩类)

3.5.1 一般特征

本类岩石的化学成分特点是 SiO_2 含量为 52%～65%，和闪长岩相似，所以也是硅酸饱和

的岩石，也属中性岩。但和闪长岩不同的是碱质含量明显增高，Na_2O 达 4.6%，K_2O 达 5%。而 FeO、Fe_2O_3、MgO 含量较低，各为 2.5%左右，CaO 约为 3.5%，这些则又介于花岗岩和闪长岩之间。而粗面岩的 Fe_2O_3/FeO 值则远远大于正长岩。和花岗岩类一样，按其所含碱量的多少也可以分为钙碱性和碱性两个系列。

矿物成分上的特点是硅铝矿物含量高，以碱性长石为主，其次可含少量斜长石和石英。铁镁矿物比酸性岩中要多些，一般可达 20%左右，以角闪石为主，其次是辉石和黑云母。在碱性系列中则无斜长石，有时有似长石，同时可有碱性辉石和碱性角闪石。

本类岩石的颜色比较浅，多呈浅红色或灰红色，故仍是浅色岩类。此类岩石分布不多，且常与中酸性岩共生。其中较粗粒的深成侵入岩为正长岩，浅成侵入岩为正长斑岩，喷出岩则是粗面岩。

3.5.2 主要种属描述

1. 正长岩(钙碱性正长岩)

主要由碱性长石组成，其含量往往占长石总量的 2/3 以上，一般为正长石、歪长石和微纹长石或隐纹长石、少量斜长石(更-中长石)、普通角闪石、普通辉石、黑云母、石英。副矿物有锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿等。结构为半自形中-粗粒等粒或不等粒结构，亦有斑状和似斑状结构，具块状构造。颜色为灰白色、肉红色。正长岩按其中次要矿物的不同可进一步分为：

石英正长岩：含石英 5%～20%。

角闪正长石：暗色矿物主要为角闪石。

辉石正长岩：暗色矿物主要为辉石，并伴有角闪石、黑云母等。

黑云母正长岩：暗色矿物以黑云母为主，但这种岩石少见。

二长岩：斜长石与碱性长石大致相等，暗色矿物含量也相应增加(有时可达 30%左右)。二长岩中若含有 5%～20%的石英时，则称为石英二长岩。

2. 正长斑岩

是正长岩的浅成侵入岩，其成分与正长岩相同，所不同的是常呈斑状结构，斑晶以碱性长石为主，也有少量暗色矿物，基质由碱性长石及少量斜长石组成。正长斑岩常呈脉状产出。

正长岩受热液作用后，常可发生钠长石化、高岭土化、碳酸盐化、绿泥石化和绿帘石化。

3. 粗面岩

是喷出岩的代表岩石，矿物成分与正长岩基本相同，以碱性长石为主，但通常是透长石或歪长石，还含少量斜长石、石英。暗色矿物较少，为黑云母、角闪石。副矿物同正长岩中所见。颜色一般为灰白、粉红、淡绿色等，大多数断面粗糙，故称粗面岩。具斑状结构，斑晶除碱性长石(透长石)外，还有斜长石、黑云母和角闪石，基质为隐晶质，主要为碱性长石。常为块状构造，可有气孔构造、流纹构造。按照粗面岩中出现的铁镁矿物斑晶的不同，可将粗面岩细分为黑云母粗面岩、角闪粗面岩、辉石粗面岩。

粗面岩由于粘度大，常呈岩钟、岩流产出。粗面岩分布比玄武岩和安山岩要少得多，多半与玄武岩、安山岩共生。

粗面岩类比较常见的蚀变有高岭土化、硅化、叶蜡石化和绢云母化。

3.5.3 有关矿产和工业用途

与正长岩有关的矿产，主要是矽卡岩型的磁铁矿，和碱性正长岩相伴的还有稀有和放射性

元素矿产。

正长岩可作陶瓷工业助熔性原料，富钾的正长岩还可作钾肥原料使用。

与粗面岩有关的矿产已知者是和角斑岩相伴的铜矿、锌矿等。粗面岩的抗压强度为600～700kg/cm²，可用作建筑材料，也可作为耐酸材料。

3.6 霞石正长岩—响岩类（碱性中性岩类）

3.6.1 一般特征

本类岩石化学成分的特点是 SiO_2 的含量接近于中性岩而偏低一些，约为54%，所以是硅酸不饱和的岩石，但其碱质含量都特别高，Na_2O 可达5%～11%，K_2O 可达4%～12%，因之，习惯上将其叫做碱性岩。$FeO+Fe_2O_3$ 仅有5%～6%左右，MgO 和 CaO 则低至1%～2%上下。另外挥发组分和稀有元素的含量也较高。

矿物成分上的特点是硅铝矿物主要是碱性长石（含量在60%以上）和似长石类矿物（含量在20%左右），没有石英。铁镁矿物都是碱性辉石和碱性角闪石及富铁黑云母，它们的含量一般为15%～20%，此外，还有多种成分复杂的含铌、钽、钛等硅酸盐类矿物。

本类岩的颜色仍属于浅色岩类，为浅灰色或淡红色。岩石的结构构造往往变化多端。此类岩石在地表分布很少，约占岩浆岩的1%，岩体的规模也很小。

本类岩石深成侵入岩为霞石正长岩，浅成侵入岩为霞石、正长斑岩，喷出岩则为响岩。

3.6.2 主要种属描述

1. 霞石正长岩

由碱性长石（65%～70%）、霞石（20%左右）、碱性辉石、碱性角闪石（10%～15%左右）以及副矿物组成，不含斜长石和石英。颜色常为浅灰色，有时为淡绿色、浅红色等，结构变化较大，一般为半自形中-粗粒结构。构造亦多变，常见的构造有块状构造、似片麻状构造和条带状构造。霞石新鲜时断口为油脂光泽。霞石易风化，所以岩石的表面可呈蜂窝状。常见的次生变化有钠长石化、碳酸盐化和霓石化。

2. 霞石正长斑岩

是矿物成分与霞石正长岩相当的浅成岩，具斑状结构，斑晶为钾长石，基质则由细粒的碱性长石、霞石及少量的暗色矿物组成。当暗色矿物增多时，即过渡为霞霓斑岩。

3. 响岩

是喷出岩的代表。矿物成分和霞石正长岩基本相似。多具斑状结构，也有无斑隐晶质结构。斑晶主要由碱性长石（透长石、钠透长石、歪长石）和霞石组成，有时可出现少量其他的似长石和暗色矿物。基质为致密隐晶质，由霞石和透长石微晶及少量辉石组成。颜色为灰色、灰绿色。响岩在地球上分布不多，我国亦少见，常呈较小型岩钟、岩流产出。

3.6.3 有关矿产和工业用途

与霞石正长岩类有关的矿产主要是稀有和放射性元素矿床，如 Nb、Ta、Zr、Th 和 V 等。有时，还有可观的磷灰石矿与其伴生，富含霞石的岩石还可用作提取铝和制玻璃的原料，霞石

正长岩中的长石是陶瓷工业上很优良的助熔性的原料。

与响岩有关的矿产是一些金矿、铜矿等矿脉。

3.7 脉 岩 类

这是一类比较特殊的岩类，在分类表中没有特定的位置。所谓脉岩是指除了前述的各类岩石之外，还有一些岩浆岩常呈脉状或岩墙状，充填于岩体或其围岩的裂隙中，由于其产状多作脉状，故统称之为脉岩。脉岩在成分上和空间分布上常和一定的深成岩体相关，如前述的各类浅成岩（亦可称脉岩）像花岗斑岩、正长斑岩、闪长玢岩等。有的则和相伴存的岩体在成分上或者结构上有明显的差别，如以浅色矿物为主要成分，属于浅色脉岩的细晶岩和伟晶岩。如以暗色矿物为主要成分，属于暗色脉岩的煌斑岩。

3.7.1 煌斑岩

煌斑岩是一种暗色脉岩的总称。其化学成分的特点是 SiO_2 的含量较低，约在 40%～52%之间，而碱金属含量较高，同时含有大量的 FeO、CaO、MgO，此外，还经常含有较多的 TiO_2。在矿物成分上的特点是暗色矿物含量较多，占整个岩石的 1/3，常见的是角闪石和黑云母。这些暗色矿物无论是在斑晶或基质中都具有较自形的晶体。硅铝矿物主要是斜长石和钾长石，呈细粒分布于基质中。

煌斑岩以其斑状结构为其特征。其斑晶几乎全是暗色矿物，岩石的颜色较深，多为灰黑和黑色。

在地表新鲜的煌斑岩少见，极容易分解，暗色矿物产生蛇纹石化、次闪石化、绿泥石化。长石产生高岭土化、碳酸盐化沸石化。

煌斑岩在我国分布很广，有些铜、钼、多金属矿产可能与煌斑岩有关。

3.7.2 细晶岩

细晶岩是浅色的脉状岩石，主要由浅色矿物成分组成，暗色矿物很少或无。细晶岩常呈岩脉产在与其关系密切的侵入体中，而且两者在矿物成分上相似，所不同的是细晶岩的铁镁矿物含量少于正常含量。细晶岩具典型的细粒他形粒状结构。晶粒细小，一般在 1mm 左右，标本上常呈砂糖状外貌。

不同的细晶岩其成分可以相差很大，每种细晶岩其成分主要与其相关的岩体有关。常见的花岗细晶岩则和花岗岩的成分近似。

由于细晶岩与相应的侵入岩关系密切，所以细晶岩也常借助于相应侵入岩来命名。如辉长细晶岩、闪长细晶岩、斜长细晶岩、花岗细晶岩、正长细晶岩等。下面重点介绍花岗细晶岩。

花岗细晶岩：此细晶岩极常见，一般简称的细晶岩多指的是花岗细晶岩。颜色常为灰白色、浅肉红色，主要是石英、钾长石、酸性斜长石组成。偶尔有白云母、黑云母或二者皆有，是典型的细晶结构。分布很广，常与花岗岩类侵入体密切共生。在表生作用下，会发生绢云母化和高岭土化。有一些硫化矿脉和铌钽矿床与此细晶岩有关，在陶瓷工业中亦是重要的原料来源之一。

3.7.3 伟晶岩

伟晶岩是具有巨粒结构的脉岩，它们除呈脉状产出外，还常常呈不规则团块状、透镜状。伟晶岩的化学成分和矿物成分与各种相应的深成岩体相似，多分布于这些深成岩体内或在岩体附近的围岩中。伟晶岩其晶粒粗大，在 5mm 以上，有的可达数米(重达几吨)，一般在 1～5cm 之间，形成所谓伟晶结构。

由于伟晶岩与相应的深成侵入岩关系密切，所以伟晶岩也借助于相应侵入岩及矿物成分来命名分类。有伟晶辉石岩、辉长伟晶岩、闪长伟晶岩、花岗伟晶岩、正长伟晶岩、霞石正长伟晶岩。下面重点介绍花岗伟晶岩。

花岗伟晶岩：分布很广，最有经济价值。一般所称的伟晶岩多数都指的是花岗伟晶岩。一般呈灰色、肉红色。成分相似于花岗岩。主要组成矿物是石英、长石(微斜长石、钠-更长石)和云母，它们约占总体积的 90%～95%以上，次要矿物有锂云母、电气石、石榴子石、绿柱石、黄玉及其他含 B、F、$(OH)^-$ 等挥发分的矿物。此外，还可含稀有、稀土金属矿物等。常具伟晶结构和文象结构，以及带状构造。

我国花岗伟晶岩分布十分广泛，遍及全国各地，与花岗伟晶岩有关的矿床有 40 种以上，都是现代工业重要资源。它们是稀有金属矿床，如 Li(锂辉石、锂云母)、Be(绿柱石)、Nb-Ta(铌铁矿-钽铁矿)、Cs(铯榴石及含铯锂云母)，稀土元素矿床如 Y(磷钇矿、硅铍钇矿)、Ce(独居石、褐帘石)，非金属矿床如白云母、水晶、长石等。另外，在陶瓷工业上，花岗伟晶岩是重要的陶瓷原料来源。尤其是正长伟晶岩、霞石正长伟晶岩是非常优良的助熔性原料。

4 沉积岩通论

4.1 沉积岩的概念

沉积岩是在地表和地表不太深的地方形成的地质体,它是在常温常压下由风化作用、生物作用和某些火山作用所形成的沉积物,经搬运、沉积和成岩等作用而形成的岩石。

因此,和岩浆岩、变质岩相比,沉积岩形成作用的特点主要为:

①沉积岩形成于常温、常压的条件下,形成温度一般在－70℃至＋85℃之间,压力在1～20个大气压之间。

②沉积岩在形成过程中往往伴有生物的作用。

③沉积岩的形成是在富含H_2O、CO_2和O_2的条件下进行的。

④绝大多数沉积岩都是经历了母岩的风化作用、搬运作用、沉积作用和成岩作用四个阶段。

⑤沉积岩的物质来源是岩浆岩、变质岩和原有的沉积岩等。

沉积岩是分布相当广的一类岩石,按统计,沉积岩分布面积占地表面积75%,按我国已经进行过地质测量的面积计算,沉积岩的分布面积占77.3%,岩浆岩和变质岩只占22.7%,但是就其重量而言,沉积岩只占5%。沉积岩的分布面积虽然广泛,但主要分布于地表和地表以下不深的地方,各地厚薄不一,最厚不过数十千米。如果以沉积岩的岩石类型而论,页岩、砂岩和石灰岩的分布最广,它们约占全部沉积岩分布面积的99%,其中又以页岩分布最多,砂岩次之,石灰岩更次之。

沉积岩中蕴藏着大量而丰富的矿产和能量资源。例如,可燃性有机岩(石油、煤、天然气等)和盐类矿产几乎全部产于沉积岩中。放射性原料、黑色金属、有色金属、稀有和分散元素、农业化肥原料、非金属矿产资源中沉积类型占很大比重。此外,有些沉积也是各种工业(特别是陶瓷、硅酸盐、冶金工业)的原料或辅助原料,例如石灰岩、白云岩、粘土岩等。

据估计,沉积和沉积变质型矿床占了世界资源总储量的80%。同时,研究沉积岩石学是了解地球发展和演变的重要手段。所以,研究沉积岩具有重要的实际意义和理论意义。

4.2 沉积岩的化学成分

由于沉积岩的物质主要来源于岩浆岩,所以其总平均化学成分和岩浆岩的总平均化学成分很相似(如表3.4.1所列)。但仔细对比,仍有以下一些差别:

①Fe_2O_3与FeO的对比关系:沉积岩中$Fe_2O_3>FeO$,岩浆岩中$Fe_2O_3<FeO$。这是因为沉积岩是在地表有充足氧的条件下形成的。

②K_2O与Na_2O的对比关系:沉积岩中$K_2O>Na_2O$,岩浆岩中$K_2O<Na_2O$或者近似相等。这是因为沉积岩中有分布很广的粘土矿物及其他胶体矿物,它们对于K有很强的吸附作

用。而 Na 的活动性比 K 高，Na 在岩浆岩风化后溶解于溶液中，并以钠的氯化物、硫酸盐等可溶盐的形成物大量集中于海洋水中。另外，沉积岩中含 K 的矿物如水云母、白云母、绢云母等，在地表稳定，而不易被分解，故沉积岩中总是 $K_2O>Na_2O$。

③沉积岩中常含有大量的 H_2O、CO_2 和有机质，这些在岩浆岩中几乎没有。这是因为沉积物在生成过程中有大量的 H_2O、CO_2 及有机生物参与和存在。

④Al 与 Ca、Na、K 的关系：沉积岩中 Al、Ca、Na、K 是互相分离存在，而且 $Al>Ca+Na+K$；而岩浆岩中则是 $Al<Ca+Na+K$，且 Al、Ca、Na、K 与 SiO_2 组成铝硅酸盐矿物如长石类矿物。

⑤Mg 和 Ca 对比关系：沉积岩中 $Mg>Ca$，岩浆岩中 $Mg<Ca$。因为沉积岩中氧化钙具有较大溶解度，被淋滤并带走至海洋中。

由表 3.4.1 还可看出，在各类沉积岩之间它们的化学成分相差很大，如碳酸盐岩(灰岩)以钙镁氧化物和 CO_2 占优势，砂岩则以 SiO_2 为主，只有页岩的化学成分与沉积岩的总平均化学成分相近，而以铝硅酸盐为主，这是由于沉积物质在风化搬运和沉积过程中发生分异造成的。

表 3.4.1 沉积岩和岩浆岩平均化学成分比较(氧化物%)

氧化物	沉积岩总平均	岩浆岩(克拉克)1924	页岩	砂岩	灰岩
SiO_2	57.95	58.14	58.01	78.33	5.19
Al_2O_3	13.39	15.34	15.40	4.77	0.54
Fe_2O_3	3.47	3.08	4.02	1.07	0.54
FeO	2.08	3.80	2.45	0.30	—
MgO	2.65	3.49	2.44	1.16	7.90
CaO	5.89	5.08	3.11	5.50	42.61
Na_2O	1.13	3.84	1.30	0.45	0.05
K_2O	2.86	3.13	3.24	1.31	0.63
H_2O	3.23	1.15	5.00	1.63	0.77
P_2O_5	0.13	0.30	0.17	0.08	0.04
CO_2	5.38	0.10	2.63	5.03	41.58
SO_3	0.54	0.05	0.64	0.07	0.05
BaO	—	0.06	0.05	0.05	—
TiO_2	0.57	1.05	0.65	0.25	0.10
C	0.65	—	0.89	—	—
总计	99.92	99.61	100.00	100.00	100.00

4.3 沉积岩的矿物成分

沉积岩中已知的矿物有 160 种以上，但比较重要的仅有 20 余种，约占沉积岩组成总重量的 99%，它们是石英类、长石类、粘土矿物类、云母类、碳酸盐类、硫酸盐类、卤化物及含水铁、锰、铝的氧化物和氢氧化物类等。在一种沉积岩中矿物成分不过 1～3 种，很少超过 5～6 种。

由于沉积岩与岩浆岩形成条件不同，反映在矿物成分上亦不同(如表 3.4.2 所列)，其差异

如下：

表 3.4.2　沉积岩与浆岩平均矿物成分比较表

矿　　物	沉　积　岩(%)	岩　浆　岩(%)
粘土矿物	14.51	—
沉积铁质矿物	4.00	—
白云石及一部分菱铁矿	9.07	—
方解石	4.25	—
石膏及硬石膏	0.97	—
磷酸盐矿物	0.15	—
有机物质	0.73	—
白云母	15.11	3.85
石英	34.00	20.40
榍石及钛铁矿	0.02	1.46
磁铁矿	0.07	3.15
正长石	11.02	14.85
钠长石	4.55	25.60
钙长石	—	9.80
黑云母	—	3.86
角闪石	—	1.66
辉石	—	12.10
橄榄石	—	2.65

①橄榄石、辉石、角闪石及黑云母等铁镁矿物，在岩浆岩中可大量存在，而在沉积岩中没有或少见。因为它们是在高温高压下形成的矿物，而在地表常温常压下不稳定。

②石英、钾长石、钠长石、白云母等矿物，在岩浆岩和沉积岩中都比较多，所不同的是，岩浆岩中钾长石、钠长石较多，而沉积岩中石英、白云母较多。

③沉积岩的特征矿物有粘土矿物、石盐、石膏、碳酸盐、有机物质，它们大都是在常温常压下形成的矿物，而在岩浆岩中却没有或极少。

④SiO_2 在岩浆岩中全部是石英，而在沉积岩中除了石英之外，还出现了胶体矿物——玉髓、蛋白石等，而且分布很广。

根据风化产物的不同，沉积岩中的矿物成分可分为三种类型：

①碎屑矿物：如石英、长石、云母以及某些重矿物，其中以石英最多，长石次之，云母更次之。重矿物(指比密度>2.9)常见的有锆石、磷灰石、石榴子石、蓝晶石、金红石、十字石等。

②粘土矿物：为硅酸盐和铝硅酸盐类矿物化学分解的产物，是沉积岩中数量较多的矿物，它们的种类很多，主要有高岭石、蒙脱石、水云母等。

③化学沉积矿物：从真溶液沉淀和胶体凝聚而成的矿物。有硅质矿物蛋白石、玉髓、沉积石英；碳酸盐矿物方解石、白云石、菱铁矿、菱镁矿；硫酸盐矿物石膏等；氢氧化物褐铁矿、铝土矿；铁的硅酸盐矿物海绿石、磷绿泥石；磷酸盐矿物磷灰石；盐类矿物石盐、钾盐、光卤石等。

4.4 沉积岩的结构、构造和颜色

4.4.1 沉积岩的结构、构造

沉积岩的结构、构造是沉积岩的重要特征，它不仅是沉积岩类型划分的根据之一，而且从结构构造的研究中，可以了解沉积岩的形成过程，对恢复古地理、古气候等方面有着重要的作用。

沉积岩的结构和构造的概念不同于岩浆岩的结构和构造所述。

沉积岩中的结构比较多样，不同成因、不同类型的沉积岩具有不同的结构，如碎屑岩具碎屑结构，生物岩具生物结构等，本教材将结构放在下章沉积岩各论中分别介绍，下面仅对沉积岩中按形态常见的构造类型作些必要的简述。

1. 层理构造

层理构造是岩石的颜色、成分和结构沿垂直方向变化而形成的一种层状构造。层理是沉积岩最重要的一种构造特征，是区别岩浆岩和变质岩的最主要的标志。根据沉积岩的层理特征，不仅可确定沉积介质的性质和能量状况，而且还可以判断沉积环境，有的层理可以确定水的运动方向。

根据层理的基本形态，又可分为水平层理、波状层理、斜层理三种基本类型(如图 3.4.1)。

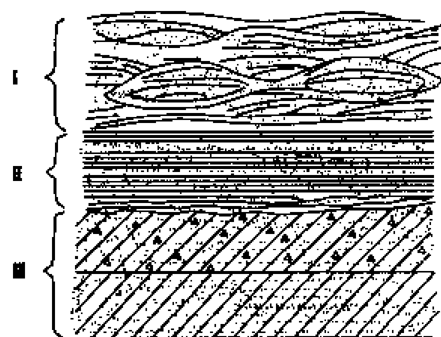


图 3.4.1 层理的基本类型

Ⅰ—波状层理；Ⅱ—水平层理；Ⅲ—斜层理

2. 层面构造

未固结的沉积物，由于机械原因或由于生物活动在其表面所造成的痕迹有时可以被后来的沉积物所覆盖而保留在层面中，这种构造现象称为层面构造。层面构造形成于岩层的顶面，但也可以在上覆岩层的底面上留下印模。对层面构造的研究可以帮助恢复沉积环境，确定地层是否倒转等。

层面构造包括：波痕、泥裂、雨痕、冰雹痕、虫迹以及各种印痕等。

3. 结核构造

结核是指在成分、结构、颜色等方面与围岩有显著区别的矿物集合体。

结核的大小变化很大，大者达几米，小者仅几毫米，一般为数厘米至数十厘米。它的形态有球状、扁球状、椭圆状以及各种不规则形状等。其内部构造有均质的、有同心圆状、放射状、花苞状，甚而空心状等。结核在岩层中可以单独存在，也有成串珠状群体顺层断续分布，与围岩界线有的明显，有的不明显。

按结核的成分可分为碳酸盐结核(菱铁矿、镁菱铁矿、铁白云石、白云石、方解石结核等)、硫化物—铁质结核(黄铁矿、白铁矿)、硅质结核亦称燧石结核(蛋白石、玉髓、石英)、磷酸盐结核、铁—锰质结核等。

对结核的研究可以帮助了解沉积岩的生成环境，也可以帮助对比地层(即结核对比法)。

4. 缝合线构造

缝合线最常见于碳酸盐岩中，但也可出现于砂岩、硅质岩和盐岩中，其特征是在垂直于岩

层的断面上有呈头盖骨接缝样子的锯齿状裂缝(图3.4.2所示)。在平面上缝合线呈参差起伏的"面",该面称为缝合面,沿此面易于裂开。缝合线可用于划分和对比地层,找层面测产状,了解岩石存在和改造的环境。

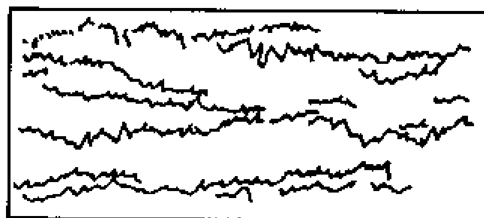


图 3.4.2 缝合线

4.4.2 沉积岩的颜色

颜色是沉积岩一个直观的很重要的标志,它反映了岩石的成分、结构和成因。同时也可作为分层、地层对比和推断古地理条件的重要标志之一,还有助于寻找矿产。

沉积岩的颜色按成因可分为原生色和次生色。原生色又可分为继承色及自生色两种。

继承色:取决于碎屑物质的颜色,常为碎屑岩所具有。如纯石英砂岩呈白色,是由于无色透明的碎屑石英造成;长石砂岩常呈肉红色,是因碎屑长石是淡红色。

自生色:取决于沉积和成岩阶段形成的自生矿物的颜色,为大部分粘土岩、化学岩和部分碎屑岩所具有,如含 Fe^{3+} 的页岩就是红色或黄褐色。含成岩矿物海绿石的岩石常带绿色,是因海绿石呈绿色。

次生色:是在后生作用或风化作用过程中,原生色发生次生变化而形成的。如红色岩层中局部地方 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 而使岩石变为绿色。

原生色在岩石中的分布均匀且稳定。而次生色分布不均匀,呈斑块状、斑点状,常沿裂隙或孔洞分布,可切穿层理,在风化带发育。在自然界中常见的是原生色和次生色共同存在的混合色。

自生色和次生色往往与色素离子有关,如含微量的 Fe^{3+} 可使岩石呈红色、棕色和黄色等;含微量 Fe^{2+} 可使颜色呈绿色、灰色等;含有机质可使岩石呈暗灰至黑色。总之,沉积岩的不同颜色取决于成分并与其形成条件密切相关。现将几种常见的颜色介绍如下:

白色:一般不含色素离子,如质纯的碳酸盐岩、高岭土、盐岩、石英砂岩等。

赤色、黑色:由于含有机质(炭质、沥青质)或分散状硫化铁(黄铁矿、白铁矿)颗粒,这些物质含量愈高,颜色愈深,并表明岩石形成于还原或强还原条件下。

红色、紫红色、褐红色、黄棕色:是由于含有铁的氧化物或氢氧化物染色的结果,表明当时沉积介质为氧化及强氧化条件。其中黄色常见于炎热干燥气候条件下的陆相沉积物中,红色常见于炎热潮湿气候条件下的陆相或海相沉积物中。

绿色:由于含有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的硅酸盐矿物(海绿石、鲕绿泥石),代表弱氧化或弱还原的介质条件,若岩石中含角闪石、绿泥石、绿帘石等碎屑矿物,也可呈绿色。

蓝色、青色:是硬石膏、天青石、石膏、石盐等特有的颜色,有时蓝色是由蓝铁矿、蓝铜矿引起的。

紫色:与氧化铁及氧化锰有关,有时则由于含土状萤石之故。

岩石的颜色除与成分、生成条件有关外,还与粒度、干湿情况有关,粒度愈细则相应的颜色更显得深一些,湿的比干的颜色要深些。

4.5 沉积岩的形成过程

沉积岩的形成大都经历了风化作用、搬运作用、沉积作用、成岩作用和后生作用等几个过程，而且每一个过程都或多或少在沉积物或沉积岩上留下烙印，使之具备一定的特征，为恢复沉积岩和沉积矿产的形成历史提供了依据和可能。

4.5.1 风化作用

沉积岩的风化作用主要有物理风化和化学风化。物理风化主要表现在崩解、破碎，化学风化主要有水解作用和化学反应。

4.5.2 搬运作用

搬运作用是指风化作用所形成的产物被运移和带走的作用，搬运作用是在母岩一旦开始遭受风化作用就同时进行着。实际上，风化作用、搬运作用、沉积作用三者既连续又独立，它们是交互进行着，在搬运过程中可以发生风化作用、沉积作用。即使物质沉积下来后，仍可以产生风化和搬运作用。

如前所述，母岩的风化产物有三类：碎屑物质、粘土物质和溶解物质（它们分别形成碎屑矿物、粘土矿物和化学矿物）。它们除了少部分残留原地组成风化壳堆积外，大部分被搬运走，并在新的适当的地方沉积下来。三者的性质不同，它们的搬运、沉积方式也不同。

主要搬运营力有水、风、冰川以及重力和生物的作用。按搬运方式可以分为：机械搬运、化学搬运、生物搬运。

1. 机械搬运作用

碎屑物质和粘土物质多以机械方式在流水、海水、湖水、冰川、风及重力等作用下被搬运。

①碎屑物质在流水中的搬运作用

流水包括雨水、暂时性流水及河流。碎屑物质在流水中搬运或沉积主要受两方面的因素控制，一方面是碎屑物质的重力及它们之间相互的吸引力和摩擦力；另一方面是流水的动力，包括流速、流量及流水性质等。当动力大于重力，并克服了摩擦力时，物质就被搬运，相反则发生沉积。碎屑物质在流水中被搬运的方式主要有以下三种：

悬浮搬运　即碎屑颗粒离开河底悬浮于水中所进行搬运的一种方式。这种方式一般是搬运颗粒细小、比重轻、球度低的碎屑。

滚动搬运　指碎屑颗粒在水底滚动前进的搬运方式，滚动搬运的碎屑物质较粗，并且多为容易滚动的圆形球体状碎屑物。

跳跃搬运　碎屑颗粒间歇性地离开河底以跳跃方式进行搬运，它是介于悬浮搬运与滚动搬运之间的一种搬运方式，因此它所搬运的碎屑颗粒大小也介于两者之间。

随着搬运距离加长，碎屑物质要发生以下变化：粒度变细；圆度、球度变好（粉砂粒则始终不好）；颗粒的分选愈来愈好；稳定矿物增多，不稳定矿物减少，即岩石的矿物成熟度渐好。

②碎屑物质在水盆地中的搬运作用

水盆地包括海洋和湖泊等固定水体。其搬运营力有波浪、潮汐及海流等。碎屑物质在水盆地的搬运不同于河流，因为河流的搬运是单向的前进运动，而水盆地中的搬运则多是往返的

运动，单向前进运动只属于次要的地位。海洋对沉积物的改造比河流要大100倍，故所造成的海相碎屑沉积物分选好、磨圆好、岩石的结构成熟度及矿物成熟度均高。

③碎屑物质在风中的搬运作用

风的搬运及沉积广泛分布于气候干旱的沙漠区，在海岸地带也可见到(如海岸沙丘)。风力搬运与流水不同，风只能搬运碎屑物质，而不能搬运溶解物质。风的搬运能力也比流水小，一般只能搬运细粉砂、粘土及黄土，大风时可搬运砂，甚至砾石。风的搬运方式有悬浮、滚动、跳动，而以跳动方式为主。

风搬运的碎屑物质，分选好、磨圆好，砂粒表面有霜面，风成沉积物可以形成大型砂丘。

④冰川的搬运作用

一般见于高寒地区，其搬运方式主要是碎屑物质包于冰中或浮于冰上呈固体方式搬运，有一部分则沿谷底拖运。

冰川搬运沉积物的特点：冰川搬运能力巨大，可以运载千吨以上的大石块(冰川漂砾)；冰川砾石多呈棱角状；由于冰川呈固体搬运，故冰碛物毫无分选，也无磨圆，更无化学分解，常常是巨大的石块与泥沙混积，毫无降落沉积的特点；在冰川的移动过程中，由于石块的相互摩擦，可形成特殊的冰擦痕——钉形痕。

2. 化学搬运

是母岩的风化产物中的溶解物质在地表水或地下水中呈胶体溶液或真溶液状态被搬运的作用。化学搬运的营力亦是在流水、海水等作用下进行。根据溶解物质在介质中的存在状态，化学搬运作用可以分为胶体溶液和真溶液搬运两种方式。

化学搬运物质组分溶解度大小的顺序为：Al_2O_3—Fe_2O_3—MnO—SiO_2—P_2O_5—$CaCO_3$—$CuSO_4$—NaCl—$MgCl_2$，后面的溶解度比前面的大。前面的Al、Fe、Mn、Si等的氧化物难溶于水，且一般呈胶体溶液被搬运，后面的Ca、Mg、Na等物质由于其溶解度大，故成真溶液被搬运。

3. 生物搬运

生物通过自己的生活活动，直接或间接地对化学元素、有机或无机的各种成矿物质进行分解与化合、分散与聚集，以及迁移等作用，并在多种适宜的水体中沉淀，形成有关的岩石或矿床。

生物参与沉积物的搬运和沉积有两种方式：

①直接作用

生物在其生活的过程中，从周围介质中吸收一定量的物质组成骨骼和有机体，生物死亡后就堆积成岩石或矿床。如生物灰岩、礁灰岩、磷块岩、硅藻土及白垩等。有的则是由生物遗体中的有机质转化而成，如石油、天然气、油页岩及煤等。

②间接作用

主要表现在由于生物的活动，而引起周围介质条件的改变，从而影响某些物质的搬运和沉积。如由于生物活动而引起的CO_2含量的变化，就可影响碳酸盐的沉淀或溶解。生物遗体的腐烂分解能产生大量的H_2S、NO_3、CH_4等气体，影响着沉积介质的氧化-还原条件，影响沉积物质的溶解或再分配。

另外，由于生物分解产生的腐殖酸，可保护胶体不易沉淀，从而促进了Al、Fe、Mn、Si等物质的搬运。生物还可以从周围介质中吸取某些溶解物质，这就帮助了元素的迁移、分散和聚集

作用。如铀、铜等元素的迁移和富集，往往与生物及有机质相关。

4.5.3 沉积与成岩作用

松散的沉积物沉积以后转变成固结岩石的作用，称为沉积物的成岩作用（或称石化作用）。沉积物在成岩作用中的变化主要有以下几个方面：

1. 压固作用（压缩作用）

这是在压力的作用下使疏松的沉积物固结成岩的一种成岩作用。由于上覆沉积物不断加厚和水体的静水压力，使松散沉积物的含水量减少，体积缩小，并转变得较为致密。所以压固作用的强度是与上覆沉积物厚度、压力作用时间的长短、沉积物的粒度和成分、溶液的性质、温度等有关。如新鲜软泥的孔隙度可达 80%，被压固成岩的页岩其孔隙度小于 20%，又如新沉积的粘土空隙可达 45%～50%，压缩后形成粘土岩，其孔隙仅有 5%。

2. 胶结作用

胶结作用是指松散的碎屑颗粒被粘土物质或化学沉淀物粘起来的一种作用，其结果是使沉积物变为坚固的岩石。砾石、砂粒等碎屑物质一旦被胶体物胶结，就固结成岩。最常见的胶结物质是粘土矿物、方解石、蛋白石、玉髓、石英、赤铁矿、石膏等。

胶结作用的强弱程度取决于胶结物的成分与含量，胶结物含量少而成分为粘土质者，胶结作用就弱，胶结物含量多而成分为硅质或者是铁质，则胶结作用强。

胶结作用最终是使沉积物完全固结成岩，并减少其孔隙度。

3. 重结晶作用

在成岩过程中，沉积物的矿物成分借助于溶解、局部溶解或固体扩散等方式，使物质质点重新组合，使细小颗粒逐渐合并成粗大的晶粒，称为重结晶作用。沉积物通过重结晶作用，不仅可以固结岩石，同时也形成新的结构和构造。

重结晶作用的产生及其强弱，决定于原始沉积物的成分、质点大小以及成分的均一性、比密度等。一般而言，沉积物的颗粒越细，溶解度越大，成分越均一，则其重结晶作用越强烈，如碳酸盐、盐类等矿物在成岩过程中很容易发生重结晶，形成粗大的晶体。温度和压力的增加，也能促进重结晶作用。沉积物中各种矿物重结晶的次序与矿物比密度和结晶能力有关，一般是比密度大而分子体积小和结晶能力大的矿物先发生重结晶，所以，在沉积岩中晶体完好的和呈结核出现的往往是比密度较大的矿物，如黄铁矿、白铁矿、菱铁矿、磷灰石等。

4. 成岩矿物的形成

在成岩作用阶段所生成的矿物称为成岩矿物。

有人认为在海盆地中，除方解石、文石、铁与锰的氢氧化物、二氧化碳等无疑是由化学及生物化学作用直接从水中沉淀外，其余绝大多数新生矿物都是成岩阶段形成的，如菱铁矿、菱锰矿、黄铁矿、硫锰矿、鳞绿泥石、海绿石、白云石、蒙脱石、水云母、沸石等。

沉积物成岩作用中的变化除上述以外，还有细菌作用、溶解作用、交代作用、胶体老化、结核的形成等。

总之，以上这些作用的总的趋势是使疏松物质变得更为坚固。

4.5.4 后生作用

在沉积物固结成坚硬的岩石之后，直至岩石风化或变质之前的这一阶段内所发生的一切

作用，称为后生作用。

后生作用是在温度较大、压力较大，有外来物质(来自深部的气相、液相物质)加入的情况下的一切作用，称为后生作用。

后生作用是在温度较大、压力较大，有外来物质(来自深部的气相、液相物质)加入的开放系统中进行的。由于温度、压力高，作用时间长，故形成的后生矿物晶体粗大，晶形完好，又由于有外来物质加入，故新生的矿物成分可与本层物质无关，其分布不受层理的控制，可切穿层理。

沉积岩在后生作用过程中所发生的变化有压固、压溶、重结晶、交代等作用以及后生矿物的形成。压固、压溶、重结晶作用常只引起岩石结构构造的变化，而交代作用除能引起岩石的结构和构造的变化外，还能引起岩石成分的变化，产生新矿物等。

在相同的后生作用条件下，以生物岩、化学岩、粘土岩的后生变化最显著，碎屑岩较差。而在碎屑岩中，胶结物要比碎屑变化显著。但总的来说，这些变化仍然没有改变沉积岩的基本性质。如果在后生作用阶段，沉积岩的埋藏深度继续加大，温度、压力继续升高，则后生作用会逐渐向变质作用过渡；反之，随着埋藏深度的减少，温度、压力降低，后生作用便逐渐过渡为风化作用。

4.6 沉积岩的分类

目前沉积岩的分类还没有一个统一的原则，这是因为生成沉积岩的作用是多种多样的，成分几乎相同的沉积岩其成因可以很不相同。

一般是以成因作为基本类型的划分依据，而以成分、结构、构造等特征再作进一步分类。这样的分类是比较合理和切实可行的。

因此，根据沉积岩的成因、物质成分和结构等特征，可将沉积岩分为三大类：

1. 碎屑岩类

主要由母岩机械破碎形成的碎屑物质组成。本类岩石可按碎屑大小细分为砾岩(包括角砾岩)、砂岩、粉砂岩。

2. 粘土岩类(或称泥质岩类)

主要是母岩机械破碎和化学分解的产物，由粘土矿物组成。本类岩石可按固结程度成分、成因进一步细分。

3. 化学岩和生物化学岩类

本类岩石是由母岩化学分解所形成的溶解物质，呈真溶液或胶体溶液搬运，通过化学作用或生物化学作用沉积而成的岩石。本类岩石按成分、成因可细分为铝质岩、铁质岩、锰质岩、硅质岩、磷质岩、碳酸盐岩、盐岩及可燃性有机岩。

各种基本类型的岩石之间，可出现一系列过渡类型的岩类，这些岩石可称为混积岩。

5 沉积岩各论

5.1 碎 屑 岩

碎屑岩是以母岩机械碎屑物质为主，再被其他物质胶结而成的岩石，其中要求碎屑物含量在50%以上，它的分布仅次于粘土岩类。

5.1.1 碎屑岩的一般特征

1. 碎屑岩的物质成分

碎屑岩的物质成分主要是由碎屑物和胶结物两部分组成。

(1)碎屑物

碎屑物质可分岩石碎屑和矿物碎屑。

①岩石碎屑(岩屑) 岩屑是母岩直接破碎的产物，是母岩破碎时矿物颗粒尚未分开的岩石碎块保持母岩结构的矿物集合体，可用来直接推断母岩。

由于母岩性质是多种多样的，所以岩屑也是多种多样，各种岩石都可呈岩屑出现，但以细晶或隐晶质岩石的碎屑为主。

②矿物碎屑 在碎屑岩中常见的矿物碎屑有20余种，而一种碎屑岩中主要的矿物碎屑不超过3～5种。

轻矿物(比密度小于2.86)的碎屑有：石英、长石、云母。

重矿物(比密度大于2.86)碎屑有：榍石、锆石、独居石、磷灰石、尖晶石、辉石、蓝晶石、橄榄石、十字石、石榴石等。

(2)胶结物

把松散的碎屑物胶结起来的物质叫胶结物，它们分布于碎屑之间，常见的胶结物有泥质、钙质(方解石)、铁质(赤铁矿、褐铁矿等)、硅质(石髓、石英)等。胶结物肉眼观察时，一般凭借岩石的颜色、硬度和与盐酸的反应等作初步判断，例如：铁质胶结的岩石呈红色；钙质胶结的岩石呈灰白色，滴稀盐酸起泡；硅质胶结的岩石坚硬，小刀刻不动；粘土胶结的岩石较松散。此外，也有白云石、菱铁矿、海绿石、鲕绿泥石、黄铁矿、硬石膏、石膏、重晶石、沸石等呈胶结物出现。

胶结物的成分和含量在碎屑岩命名中可表示出来，通常是作为形容词放在岩石名称之前，如钙质砂岩、铁质砂岩等。

2. 碎屑岩的结构

碎屑岩的结构包括碎屑颗粒本身的特点(如粒度、圆度、球度、形状以及表面特征)、胶结物的特征(如结晶程度、颗粒大小)以及碎屑颗粒与胶结物之间的关系(即胶结类型)。

(1)粒度

碎屑颗粒的大小称为粒度，粒度是以颗粒直径来度量的，将碎屑岩的粒度划分为一系列的等级称为粒级，它是碎屑岩进一步分类的依据，又是作粒度测量进行成因分析的主要对象，故

粒度是碎屑岩很重要的一个特征。

由于工作性质和目的不同，对碎屑岩粒级的分级方案很多，现介绍以下常用的两种：

①十进位标准

砾	碎屑直径＞1mm
砂	0.1～1mm
粉砂	0.01～0.1mm
泥	＜0.01mm

②自然粒级标准

砾	碎屑直径＞2mm
砂	0.05～2mm
粗砂	0.0005～0.05mm
泥	＜0.005mm

本教材在以后的叙述中，采用自然粒级标准划分。

自然界中由一种粒级组成的碎屑岩很少，经常由几种粒级的碎屑所组成，碎屑岩中颗粒大小的均匀程度称为分选性或分选程度。分选程度一般可分为好、中、差三级，当某一粒级的碎屑物含量＞75％时，称为分选好；含量在50％～75％时称为分选中等；没有一种粒级的碎屑物含量超过50％时，称为分选差。分选程度与沉积介质的性质、搬运距离等有关系，例如搬运距离长则分选程度较好，粒度也变小。

碎屑岩中的碎屑结构，常根据碎屑颗粒的粒度分为：砾状结构、砂状结构和粉砂状结构，还可根据上述粒度大小而进一步再细分。

(2)碎屑颗粒的形状

碎屑颗粒的形状包括圆度和球度。

①圆度　是指碎屑颗粒的棱和角被磨蚀圆化的程度，一般分四级：

棱角状　颗粒具尖锐的棱角，棱线向内凹进，一般说明碎屑未经搬运或搬运极近。

次棱角状　碎屑颗粒的棱和角稍有磨蚀，尖角并不十分突出，棱线较平直，说明碎屑经过短距离搬运。

次圆状　棱角有显著磨损，棱线略有向外凸出，碎屑的原始轮廓还可看出，说明碎屑经过较长距离的搬运。

圆状　颗粒的棱角全部磨损消失，棱线向外凸出呈弧线状，碎屑的原始轮廓已消失，说明碎屑经过了很长距离的搬运和磨损。

②球度　是指碎屑颗粒接近球体的程度，球度是颗粒三度空间的形状，决定于它的三个主轴的相对大小，亦可分为四级：

球状或等轴状　三轴相近或相等。

扁球状或扁状　两轴相近或相等，另一轴较短。

椭圆状或柱状　两轴相近或相等，另一轴较长。

不规则状　三轴不等或具其他特殊形式。

球度和圆度是两个不同的概念，球度高的颗粒（如晶形很好的石榴石），其圆度不一定高，球度低的颗粒（如长柱状的角闪石其边、棱被磨圆了），其圆度可能高。球度不仅与搬运距离有关，更与矿物形态有关（如片状云母矿物的球度很低）。一般对同种矿物来说，随着搬运距离的

加长，其圆度和球度均增高，球度和圆度是度量碎屑岩的结构成熟度的标准之一。

（3）碎屑颗粒的表面特征

是指碎屑颗粒的表面在外力作用下所留下来的各种痕迹，例如风成砂粒的表面具有毛玻璃状的霜面，它是由于在空气中颗粒相互接触摩擦而成，冰川作用的砾石常有钉子形擦痕和压坑，经过流水长期搬运的砾面表面常很光滑，并常有浸蚀洼坑或麻点，沙漠中砾石的表面常有一层黑而发亮的薄膜叫沙漠漆。

（4）胶结类型

指碎屑物与胶结物之间的关系，通常由碎屑物与胶结物的相对含量、生成方式以及沉积后所经历的一系列变化等因素决定，常见的胶结类型如下：

①基底式胶结　胶结物的含量较多，占岩石组分总量的25%～50%，碎屑颗粒彼此不相接触（图3.5.1中A）。

②孔隙式胶结　胶结物的含量较基底式胶结要少，它填充于碎屑颗粒之间的空隙中（图3.5.1中B）。

③接触式胶结　胶结物的含量更少，只在碎屑颗粒接触的地方才有胶结物存在（图3.5.1中C）。

④杂乱式胶结　胶结物含量较多，同时，还有细粒充填物，胶结物与充填物两者混杂在一起，分布于碎屑颗粒之间的孔隙（图3.5.1中D）。

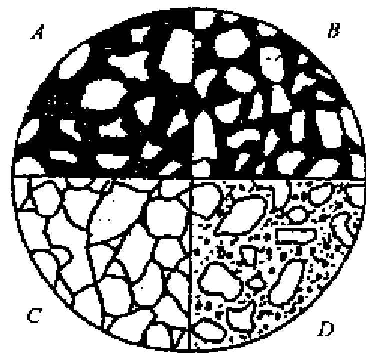


图3.5.1　胶结类型

A—基底式胶结；　B—孔隙式胶结；

C—接触式胶结；　D—杂乱式胶结

在同一岩石中可出现两种以上的胶结类型，而组成混合型，如接触—孔隙式胶结，后者为主要胶结类型。

3. 碎屑岩的构造

碎屑岩的构造主要有块状构造、层理构造、层面构造等。

5.1.2　碎屑岩的分类与命名

1. 根据碎屑颗粒的大小，可以把碎屑岩分为三类

①粗碎屑岩　砾岩和角砾岩，主要碎屑的直径在2mm以上。

②中碎屑岩　砂岩，主要碎屑的直径在0.05～2mm之间。

③细碎屑岩　粉砂岩，主要碎屑的直径在0.0005～0.05mm之间。

2. 根据碎屑颗粒大小，对碎屑岩命名的原则是：以碎屑颗粒的主要粒级含量占50%以上者来确定岩石的基本名称，如砾岩中的砾石含量大于50%；其他次要粒级含量在25%～50%之间，则以“××质”表示之，如砂质砾岩。含量在5%～25%之间者，以“含××”表示，如含砂砾岩。

5.1.3　碎屑岩主要类型描述

1. 粗碎屑岩——砾岩、角砾岩

大于2mm的碎屑含量在50%以上的岩石称为粗碎屑岩，亦称砾质岩，碎屑成分主要为岩屑，只有在较细的粗碎屑岩中有时可见到由矿物组成的砾石，重矿物极少见或几乎不见。粗碎屑岩中还可有小于2mm的碎屑（砂或粉砂），称作充填物或叫混入物。

根据砾石圆度可分为两类：

①砾岩　圆状及次圆状砾石含量大于50%。

②角砾岩　棱角状及次棱角状砾石含量大于50%。

除根据砾石圆度可进行细分外，还可依据砾石的大小、砾石的成分、砾岩的成因以及砾岩在地质剖面中的位置进一步划分。

砾石可作铺路材料，砾岩可作建筑材料，有的砾岩中可含有用矿产——金、金刚石、铀、铜等。

2. 中碎屑岩——砂岩

碎屑颗粒在0.05～2mm，其含量在50%以上的岩石称为砂岩，砂岩主要由砂粒和胶结物两部分组成，有时可混入一定量的砾石和粉砂，砂粒成分以石英为主，其次是长石和岩屑，有时可有云母、绿泥石，以及少量的重矿物，胶结物有泥质、钙质和硅质等。

砂岩按颗粒大小可分为：

粗砂岩：砂粒直径0.5～2mm。

中砂岩：砂粒直径0.25～0.5mm。

细砂岩：砂粒直径0.1～0.25mm。

微粒砂岩：砂粒直径0.05～0.1mm。

此外，砂岩的分类还可依据成分、成因等进行划分。

砂岩的主要类型描述：

①石英砂岩类

本类包括石英砂岩、长石质石英砂岩、岩屑质石英砂岩和长石岩屑质石英砂岩，现将主要的石英砂岩描述如下。

石英砂岩：含90%以上的石英（包括燧石和硅质岩）碎屑，含少量的长石、岩屑，重矿物含量很少，且多为极稳定的矿物，如电气石、锆石、金红石等，胶结物常见的是硅质，有时为钙质、铁质，泥质少见。岩石中石英颗粒圆度和分选良好，表面光滑干净，以中—细粒状常见，颜色为灰白色、浅红色、浅绿色和浅黄色，常见斜层理和波痕。

石英砂岩根据胶结物的成分可分为：硅质石英砂岩、铁质石英砂岩、钙质石英砂岩、粘土质石英砂岩、白云质石英砂岩、磷质石英砂岩等。

②长石砂岩类

本类包括长石砂岩、岩屑质长石砂岩，现将长石砂岩描述如下。

长石砂岩，长石含量>2.5%，多为正长石、微斜长石、酸性斜长石、条纹长石，石英含量<75%，岩屑含量<10%，重矿物的种类和含量较石英砂岩有所增加，除了锆石、金红石、电气石外还有稳定性差的磷灰石、独居石、榍石、角闪石等，胶结物多为泥质，也常见钙质和铁质。

长石砂岩层多数情况是块状的，碎屑的粒度较粗，一般为中—粗粒，分选性和磨圆度变化大，颜色常为红色或黄色，外貌似花岗岩。

③岩屑砂岩类

主要的为岩屑砂岩，它是以石英和岩屑为主的砂岩，名称叫法很多，亦称硬砂岩、杂砂岩、瓦克岩等，但它们对岩屑成分及含量界限的规定亦不同，因此，名称的含义也不同。

岩屑砂岩其岩屑含量>25%，长石<10%，石英<75%。岩屑砂岩中岩屑成分多种多样，随母岩而异，石英碎屑常具棱角状，长石以斜长石常见，也有钾长石，还可出现不稳定的基性斜长石，重矿物含量较其他砂岩高，不稳定和稳定的重矿物兼有。胶结物最常见的为泥质，亦可有钙质，岩屑砂岩分选、磨圆均不好，颜色较深，为灰、灰黑色、灰绿色。

砂岩具有很大的实际意义，如胶结坚硬的砂岩是良好的建筑材料，纯净的石英砂岩和未经胶结的石英砂是玻璃、陶瓷的重要原料，还可用于搪瓷、硅砖、铸型砂等，某些砂和砂岩中常富集有重要矿产，如砂金、铜、铂、锡石、锆石、独居石等砂矿。

3. 细碎屑岩——粉砂岩

碎屑颗粒大小为0.005～0.05mm，其含量在50%以上的岩石叫粉砂岩。粉砂岩的粒度和性质介于砂岩与泥岩之间，并常混有砂和粘土。粉砂岩的碎屑组分一般比砂岩简单，稳定组分较多，以石英为主，长石次之，岩屑少见，有时含有较多的白云母，重矿物含量较高，可达2%～3%以上，多为稳定重矿物。胶结物以泥质为主，其次是钙质、白云质，而铁质、硅质较少。

粉砂岩碎屑的磨圆度差，常呈棱角状，分选性时好时差，常具薄的层理构造。颜色多种多样，最常见的是棕红色和暗褐色，亦有灰色、浅黄色、黑色等。

由于岩石的碎屑颗粒细小，肉眼难以识别矿物成分和形态特征，因此往往需要作镜下鉴定或采用其他方法鉴定，野外仅根据粗糙的外貌和断口，以及用手搓捻其粉末，有粉砂质点感觉等来作初步鉴定。

粉砂岩按粒度划分为：

粗粉砂岩：碎屑颗粒的大小为0.01～0.05mm。

细粉砂岩：碎屑颗粒的大小为0.005～0.01mm。

另外，还可按碎屑成分、胶结物成分划分。

我国北方和西北广泛分布的黄土，它是一种半固结的粘土质粉砂岩，其中粉砂含量一般为40%～60%，其次为粘土，高达40%以上，再次为砂粒，直径一般小于0.25mm，含量小于10%，黄土中的主要矿物是石英、长石、碳酸盐及粘土矿物。黄土质地均匀，手搓之易成粉末，亦含有不同形态的钙质结核，无明显层理，多孔状，胶结疏松。

5.2 粘 土 岩

粘土岩是一种主要由直径小于0.005mm的颗粒组成，含量大于50%，它们呈松散状（粘土）或固结的岩石（泥岩、页岩）。粘土岩是机械沉积的碎屑岩与化学沉积的化学岩之间的过渡类型岩石，成因上多数是由胶体凝聚沉淀而成，也有机械沉积或化学沉积的，在空间分布上，可介于碎屑岩和化学岩之间。

粘土岩是沉积岩中分布最广的一类岩石，约占沉积岩总量的50%～60%。

5.2.1 粘土岩的一般特征

1. 粘土岩的矿物成分

粘土岩矿物成分比较复杂，其中以粘土矿物为主，其次为碎屑矿物、自生的非粘土矿物以及有机物等。

粘土矿物有十几种，分布最广的是高岭石、蒙脱石、水云母、多水高岭石等，它们多是很细小的，结晶大小一般不超过0.001～0.002mm，只能在电子显微镜下才可鉴定和区分。

碎屑矿物有石英、长石、云母、绿泥石及少量的岩屑等。

自生的非粘土矿物（包括化学及胶体沉积）有铁、锰、铝的氧化物和氢氧化物（赤铁矿、褐铁矿、软锰矿、水铝石等），碳酸盐（方解石、白云母、菱铁矿），硫酸盐（石膏、硬石膏、重晶石、天青

石)，硅质矿物(蛋白质、玉髓、自生石英)，硫化物(黄铁矿、白铁矿)，以及磷灰石、石盐、海绿石等。这些矿物含量虽少，但它们可影响粘土岩的性质，又能反映粘土岩的形成条件，及其生成后所受的变化。

除了以上几种组分外，粘土岩中还含有数量不等的有机质，主要是碳质、沥青质以及动、植物遗体等，这些物质的存在，可以帮助推论岩石的沉积环境。

2. 粘土岩的化学成分

粘土岩的化学成分取决于它的矿物成分和粘土中吸附离子的成分，它的主要化学组分是SiO_2、Al_2O_3、铁的氧化物及挥发物质，页岩的成分大致与岩浆岩的平均化学成分相似。另外，粘土能从周围的介质中吸收某些离子，某些被吸附的有用元素富集时，还可成为有价值的矿床，如铜、镍、铂、钒、铌、铀等，还可以吸附钙、镁、钠、钾及氯、氢等。

3. 粘土岩的结构、构造及颜色

(1)粘土岩的结构

由于粘土岩粒度细小，一般须在显微镜下才能观察，主要结构有：

①泥质结构(粘土结构)　几乎全由0.005mm以下的粘土质点组成，其含量不少于95%，粉砂及砂的含量不超过5%，这是粘土岩的主要结构。

②粉砂泥质结构　除粘土质点外，岩石中还含有25%～50%的粉砂质点，若含粉砂5%～25%，则称含粉砂泥质结构。

③砂泥质结构　除粘土质点外，岩石中还含有25%～50%的砂粒，若含砂粒5%～25%，则称含砂泥质结构。

④鲕状及豆状结构　在粘土岩的形成过程中，粘土质点围绕一个核心凝聚成鲕粒(小于2mm者)或豆粒(大于2mm者)。这种结构多见于胶体成因的粘土岩中。

⑤砾状及角砾状结构　由粘土质沉积物受侵蚀而产生的碎屑(或称泥砾)再沉积，又被粘土质胶结而成。

(2)粘土岩的构造

粘土岩的构造分大型构造和显微型构造两种，大型构造包括层理、层面(干裂、雨痕、虫迹)及变形构造等。由于物质成分和颜色的不同而形成的构造有斑点构造、带状构造及瘤状构造等也属大型构造，常见的显微构造有显微鳞片状构造等，显微鳞片状构造是由极细小的，排列方向不规则的鳞片状粘土矿物构成。

(3)粘土岩的颜色

粘土岩的颜色很杂，它决定于粘土矿物的成分、杂质矿物、有机质及所含色素的颜色，如成分单一的高岭石粘土、水云母粘土和某些蒙脱石粘土，常呈白色、浅灰色、浅黄色等。成分复杂的粘土岩，其颜色多种多样，如含细分散的铁氧化物和氢氧化物(赤铁矿、褐铁矿等)，则呈红色、紫色、棕色、褐色，含锰的氧化物时则呈褐色或黑色。富含分散状有机质和硫化铁(黄铁矿等)时呈灰色或黑色，若含较多的海绿石、绿泥石、孔雀石、蓝铜矿时，可呈绿色或蓝色。

粘土岩的颜色，一般可反映其沉积环境，如在还原环境中生成的粘土岩多呈黑色、灰黑色等。氧化环境生成的粘土岩则多呈红色、褐色等，在弱氧化—弱还原环境下多呈绿色或蓝色。

4. 粘土岩的物理性质

粘土岩具有一些与其他类型的岩石所不相同的物理性质，它们在工业上有一定的实用价值。

①可塑性

粘土岩被粉碎后，加水成泥，在外力作用下可以塑成各种形状。当外力取消后形状仍不改变的这种性质称可塑性，陶瓷工业中，各种陶瓷制品就是利用这种性质制成的。

②吸水性

某些粘土岩具有能吸收大量水分并使体积显著膨胀的性质，吸水后岩石的有效孔隙变小，透水性变差，在地层中作不透水层，可利用此性质，可作堤坝孔隙的填充剂和水库堤坝的隔水层。

③烧结性

某些粘土岩加热到一定温度后，再冷却，可形成坚硬的在水中也不会浸软的材料。这种性质称烧结性，如陶瓷的制作。

④耐火性

由于粘土岩一般熔化温度较高，所以粘土岩具有较强的耐火性，有的粘土当温度升高到1580℃以上才被熔化，称这种粘土为耐火粘土，粘土的耐火性与矿物成分和含杂质多少有关。例如高岭石粘土的耐火度最高达1790℃，而蒙脱石和水云母粘土的耐火度都较低，含微量的氧化钙、硫及金属氧化物以及铁的氧化物等可使耐火度降低。

⑤吸收性

粘土具有吸收气态、液态物质，脂肪、有机物质的能力，称为吸收性，在各种类型的粘土岩中，以蒙脱石粘土的吸收性最强，工业上利用这一性质作为净化剂、脱脂剂及漂白剂等。

5.2.2 粘土岩的分类

粘土岩的分类是一个十分复杂的问题，主要是由于粘土的成因和成分比较复杂，因此，根据不同的原则可以作出不同的分类：

(1)根据粘土矿物成分可分为：高岭石粘土岩、水云母粘土岩、蒙脱石粘土岩等。

(2)按粒度成分的分类：按粘土岩中混入的砂或粉砂物质的量可分为粘土岩、含粉砂粘土岩、粉砂质粘土岩、含砂粘土岩及砂质粘土岩。

(3)根据成因可分为残积粘土及沉积粘土。

(4)按后生作用强度分类可分为粘土(弱固结)、泥岩(强固结)、页岩(强固结，并具页状层理)。

(5)按工业用途分类

①按耐火度分为：

易熔粘土：耐火度1350℃，如蒙脱石粘土、水云母粘土。

难熔粘土：耐火度1350～1580℃，如某些高岭石含量少的复矿物粘土。

耐火粘土：耐火度＞1580℃，如高岭石粘土、多水高岭石-高岭石粘土。

②按可塑性可分为：

软质粘土：在水中变软的可塑性粘土。

半软质粘土：在水中部分变软的可塑性粘土。

硬质粘土：在水中完全不变软的非可塑性粘土。

5.2.3 粘土岩的主要类型描述

本教材仅介绍按成分分类的常见粘土和按后生作用强度分类的泥岩和页岩。

1. 粘土

指未经过固结或只经过微弱固结作用的粘土，其特点是潮湿状态时具可塑性，投入水中即行崩解，常见的粘土有高岭石粘土、蒙脱石粘土和水云母粘土。

(1)高岭石粘土

主要由高岭石组成，其含量可达90%以上，此外尚有多水高岭石及水云母等矿物，常混入有黄铁矿、菱铁矿、碎屑石英、长石、重矿物等。高岭石粘土一般为白色、浅灰色、浅黄色，当含有机质及细分散的黄铁矿时呈深灰—黑色。其外貌呈致密状，性脆，贝壳状断口，有滑感，硬度不高。

高岭石粘土大都形成于温暖潮湿的气候条件下，由铝硅酸盐矿物(主要是长石)风化分解的产物，在酸性介质(PH=5～6)的条件下，沉积于大陆、河流、湖泊、沼泽或泻湖等地区，它有两种成因类型：

①风化残积高岭石粘土：含铝硅酸盐矿物的母岩经风化分解后形成高岭石等粘土矿物在原地堆积而成。

②沉积高岭石粘土：系风化的高岭石经搬运、沉积而成，一般形成于大陆或泻湖环境，它分布广、层位稳定，常与煤系地层共生。

(2)蒙脱石粘土

又称膨润土、膨土岩、斑脱岩、漂白土等。主要由蒙脱石组成，常见的非粘土矿物有长石、石膏、方解石、石英和没有完全分解的火山凝灰物质，颜色为粉红色、白色、淡黄色、浅灰绿色等，具胶状外貌，硬度不大，有滑腻感，侵入水中剧烈膨胀，可塑性不好，耐火度低，有强烈的吸附能力。

一般认为蒙脱石粘土是由凝灰岩或火山岩在海水或地下水作用下经化学风化，并在中性或碱性(PH=7～8.5)介质环境下堆积而成。按成因亦可分为风化残积和沉积两类。

(3)水云母粘土

主要由水云母粘土矿物所组成，经常含有其他的粘土矿物(高岭石、蒙脱石)，以及石英、长石、云母、重矿物等碎屑矿物，还有自生的非粘土矿物和有机物质。纯的水云母粘土少见，颜色为黄、灰、绿、红色等。粉砂泥质结构，具水平层理或微细波状层理，水云母粘土的化学成分特点是K_2O含量高，可达3%～7%。

水云母粘土是由各种含铝硅酸盐矿物在岩石化学风化初期的产物，同时高岭石粘土、蒙脱石粘土经后生作用也可以转变为水云母粘土，水云母粘土在各种环境中均可生成，但溶液中必须富含钾。

由于水云母粘土的成分不纯，工业上用途不大，一般用作烧制粗糙的陶瓷制品的原料。

2. 泥岩和页岩

弱固结的粘土经过中等强度的后生作用(如压固作用、脱水作用、重结晶作用、胶结作用等)，即可形成强固结的泥岩和页岩。泥岩层理不明显，或呈块状，局部失去可塑性，遇水不立即膨胀，页岩具有明显的页状层理，已大部分失去可塑性。

泥岩和页岩的成分都比较复杂，其中粘土矿物多半都已经转变为水云母，有时也尚有其他粘土矿物(高岭石、蒙脱石等)、碎屑矿物(石英、长石等)、有机质(碳质、沥青质等)及化学成因物质(方解石、石膏等)。

泥岩在野外常按机械及化学混入物来命名，如钙质粉砂质泥岩、铁质泥岩、碳质泥岩等。

页岩常按混入物的成分或岩石的颜色来进一步分许多类型，常见的有以下几种：

①钙质页岩

其中含 $CaCO_3$ 不超过 25%，若超过了则过渡为泥灰岩、灰岩。常与泥灰岩、灰岩共生。

②硅质页岩

一般页岩中含 SiO_2 平均为 58%，硅质页岩达 85%，可逐渐过渡为生物化学成因的硅质岩，硅质页岩中的硅质并非碎屑石英，其硅质来源有陆源的 SiO_2 胶体或海底火山喷发的硅质，或生物成因的硅质。

③铁质页岩

含少量铁的氧化物、氢氧化物、碳酸盐（如菱铁矿）及铁的硅酸盐（海绿石、鲕绿泥石、鳞绿泥石）等成分的页岩称为铁质页岩。颜色呈红色、紫红色以及暗绿色。

④黑色页岩

页岩中含有较多的有机质及细分散黄铁矿、菱铁矿则成黑色页岩，具有极薄的层理，常呈纸状薄层，外貌与碳质页岩相似，但却不污手，形成于温暖潮湿的湖泊、沼泽的还原环境。

⑤碳质页岩

含有大量的分散的和碳化了的有机质的页岩。其中的碳质物多呈粉末状，均匀地分布于岩石中，可是肉眼不能察觉，但却能染手，因其灰分含量＞30%，故不宜作燃料，它常产于煤系地层中，常含有植物化石。

⑥油页岩

油页岩的特点是质轻，呈黄褐色或暗灰黑色，有时具有很薄的层理，粘性很强，不污手，具油腻感，指甲刻痕呈暗褐色，用小刀刨之能刨成连续的刨花状薄片，能用火柴点燃并冒黑烟，具油味。

粘土和粘土岩在我国分布十分广泛，具有很大的工业意义。例如高岭石粘土具有高的耐火度和可塑性，是良好的陶瓷原料，亦是耐火砖、橡胶、造纸、肥皂、化妆品等的重要原料。蒙脱石粘土有很强的吸收性和吸水膨胀性，因此，可在石油、制糖、造酒、纺织、油脂等工业方面用作净化剂、脱脂剂和漂白剂等，地质钻探上也广泛用蒙脱石粘土作钻探泥浆。水云母粘土可作陶瓷和砖、瓦等原料，与粘土岩有关的矿产有镍、铜、钴、钼、铌、钇、铅、铀等金属元素的富集。此外有些粘土岩是最重要的生油岩石之一，亦可作石油的良好盖层。在水文工程地质方面，粘土岩是地下水良好的不透水层。

5.3　化学岩及生物化学岩

母岩遭受化学风化作用之后形成的溶解物质，以胶体溶液或真溶液状态被搬运在沉积盆地内以化学作用或生物化学作用使之沉淀，并经成岩与后生作用即形成化学岩及生物化学岩。

5.3.1　化学岩及生物化学岩的一般特征

1. 化学岩及生物化学岩的生成方式

本类岩石沉淀方式是多种多样的，归纳可为以下几种：

①以纯化学方式从真溶液中沉淀而成的，如盐岩、某些白云岩等。

②以胶体化学方式从胶体溶液中沉淀而成的，如某些铝质岩、铁质岩、锰质岩、硅质岩。

③以生物化学方式从水溶液中沉淀而成的，如磷质岩、部分铁质岩、部分碳酸盐岩。

④由生物遗体堆积和转化而成的，如介壳灰岩、某些硅质岩以及煤和石油。

⑤由生物直接生长而成的，如礁灰岩。

⑥风化残积生成的，如某些铝质岩。

⑦在成岩后生阶段由交代作用形成的，如某些白云岩等。

本类岩石的沉淀主要受物理化学、生物化学及化学条件的支配，如介质的 pH 值、En 值、CO_2 含量、温度、压力及物质的浓度和溶解度等。所以在一定条件下往往只有一种物质沉淀，生成一种岩石，故某种单一的化学岩成分比较简单，又有独特的结构构造，可与其他岩类相区别。

2. 化学岩及生物化学岩的物质成分

根据成因，本类岩石的物质成分可分为三个主要类型。

(1)化学及生物化学成因的矿物：这是本类岩石最主要的矿物成分，常见的有下列几类：

①碳酸盐类矿物：方解石、白云石、文石、菱铁矿、菱锰矿等；

②氧化硅类矿物：石英、玉髓、蛋白石等；

③硅酸盐类矿物：海绿石、鲕绿泥石等；

④铁的氧化物及氢氧化物：赤铁矿、褐铁矿等；

⑤锰的氧化物及氢氧化物：软锰矿、硬锰矿、水锰矿、褐锰矿等；

⑥铝的氢氧化物：铝土矿；

⑦磷酸盐类矿物：氟磷灰石、氯磷灰石、细晶磷灰石、胶磷矿等；

⑧盐类矿物：石盐、石膏、硬石膏、钾盐、光卤石、杂卤石。

(2)碎屑矿物：这类矿物是作为杂质存在于本类岩石中，含量一般不多，主要有石英、长石、云母、重矿物及一些粘土矿物。

(3)有机物：碳质、沥青质、液态烃类有机物，它们是组成煤、石油、油页岩的主要成分。

3. 化学岩及生物化学岩的结构

这类岩石的结构类型很多，并与成因有密切的关系，现概略地介绍下面几种类型。

①结晶结构

化学岩和生物化学岩由结晶矿物颗粒组成时则为结晶结构，根据结晶颗粒的大小可分为不同的结构类型，如表 3.5.1 所示。

表 3.5.1　化学岩及生物化学岩依颗粒大小分类

结构类型		颗粒大小(mm)	分辨标志
砾晶(巨晶)结构		>2	肉眼能见到晶体
砂晶	粗晶结构	0.5～2	肉眼能见到颗粒
	中晶结构	0.25～0.5	肉眼能见到颗粒
	细晶结构	0.05～0.25	显微镜下能见到颗粒
粉晶	粗粉晶结构	0.03～0.05	显微镜下能见到颗粒
	细粉晶结构	0.005～0.03	显微镜下辨别不出颗粒
泥晶(隐晶)结构		<0.005	显微镜下辨别不出颗粒

②生物结构

岩石中含有一定的(如30%以上)生物遗体或介壳，以及生物碎屑时，称为生物结构，若保留的是比较完整的生物遗体、生物介壳或化石者称为生物介壳结构，若保留的是生物碎片，称为生物碎屑结构。

生物结构对沉积环境和沉积条件的研究有其重大的意义，因为不同生物生活在不同的环境中，所需的海水深度、水温、含盐度等各不相同。

③碎屑结构

在化学岩和生物化学岩中碎屑物质经胶结而成的结构称为碎屑结构，其碎屑物质大致有两种来源：一种是由沉积盆地之外的陆源区搬运来的，称为陆屑或外碎屑，另一种是沉积盆地的底部，弱固结或已固结的沉积物在流水或波浪的作用下破碎而成的碎屑称为盆屑或内碎屑。

5.3.2 化学岩及生物化学岩的分类

根据化学岩及生物化学岩的成分、成因特征及沉积分异的顺序可将本类岩石分为8类：铝质岩、铁质岩、锰质岩、硅质岩、磷质岩、碳酸盐岩、岩盐、可燃性有机岩。前7类是按沉积分异排列，可燃性有机岩由于成因特殊放在最后。

上述各类岩石分布最广的是碳酸盐岩，其次是硅质岩，其他岩石分布量比较少，但它们是重要的沉积矿产。下面按顺序简要介绍。

5.3.3 化学岩及生物化学岩主要类型描述

1. 铝质岩

富含 Al_2O_3 的化学岩称铝质岩，主要的物质成分是一水软铝石、一水硬铝石、三水铝石，次要矿物有高岭石，混入物有石英、玉髓、褐铁矿、白云母、方解石、铁质绿泥石等。

铝质岩的很多特点和粘土岩相似，两者的化学成分也是过渡的，当 $Al_2O_3 : SiO_2 > 1$ 者称铝质岩，$Al_2O_3 : SiO_2 < 1$ 者称粘土岩。

铝土矿：Al_2O_3 含量大于40%，$Al_2O_3 : SiO_2 \geq 2.6$，主要矿物成分为水铝石和三水铝石，亦有其他混入物，颜色变化很大，通常为红色、棕色、灰色，但亦有白色、黄色等，具鲕状、豆状和胶状结构，呈致密状，但也有疏松土状的。对铝土矿的成因说法很多，但大多数认为是母岩遭受剧烈的化学风化，带出溶解的氧化铝和铁的化合物在海洋、湖泊中沉淀而成。

铝土矿是重要的炼铝原料，烧结后可作人工磨料以及耐火材料，还可用于制造人造刚玉，生产特种水泥及铝盐等。

2. 铁质岩

含有大量铁的化合物的沉积岩叫铁质岩，铁质岩中的含铁矿物有磁铁矿、赤铁矿、水针铁矿(氧化物)、菱铁矿、菱镁铁矿(碳酸盐)、鲕绿泥石、鳞绿泥石、海绿石(硅酸盐)、黄铁矿、白铁矿(硫化物)等，此外，非含铁矿物也极为普遍，如石英、长石、方解石等。

铁质岩的主要类型有：氧化铁质岩、鲕绿泥石岩、菱铁矿岩、硫化铁质岩。

铁质岩主要形成于温暖和潮湿的气候条件下的浅海或滨海或者湖泊沼泽地带，由胶体沉淀而成，具有鲕状、肾状结构。

铁质岩中铁矿物含量高，达到工业要求时，则为铁矿石，是炼铁的主要原料，大量的硫化铁质岩可作为提取硫的原料。

3. 锰质岩

富含锰的化合物的沉积岩称锰质岩，当含锰在20%左右者即成锰矿。主要矿物组成为软锰矿、硬锰矿、水锰矿、榍锰矿、含锰方解石等。主要类型有氧化锰型锰质岩、碳酸盐型锰质岩，常具鲕状、肾状等结构。

具有工业价值的锰矿大多是海成的锰质岩，锰矿主要用于黑色冶金工业，仅少量用于化学工业。

4. 硅质岩

硅质岩是指由化学作用、生物化学作用和某些火山作用所形成的富含 SiO_2（可达70%～90%）的岩石，不包括主要的机械沉积作用所形成的石英砂岩和沉积石英砂，虽然有时它们的 SiO_2 含量在90%以上。

硅质岩化学成分比较简单，主要是 SiO_2，此外，还有 CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3 等混入物，矿物成分有蛋白石、玉髓和自生石英，其次是有碳酸盐类矿物、粘土矿物、氧化铁和海绿石等。其中蛋白石为凝胶体，它与玉髓可以是化学沉积的，也可以是生物作用形成的，自生石英多半由蛋白石、玉髓等重结晶而成。

硅质岩多为灰黑色，少数呈白色或红色，其结构多为隐晶质和非晶质致密块状结构及生物结构，常呈薄层状或透镜状、结核状构造，岩性坚硬，性脆，化学性质稳定，不易风化。

根据成因，硅质岩可分为两种类型：

生物成因类型：如硅藻土、海绵岩、放射虫岩、板状硅藻土蛋白土等。

非生物成因类型：如碧玉岩、燧石岩、硅华等，它们可以是化学成因的，也可能是次生交代形成的，或与火山作用有关。

①硅藻土，主要是硅藻类遗体（硅藻壳）所组成，硅藻个体很小（0.03～0.15mm），含量不定，有时占岩石的70%～80%，矿物成分主要为蛋白石（硅藻虫是能从水中吸取 SiO_2 形成躯壳的一种低等动物，现在已知达10000多种），其次还混有粘土矿物、碳酸盐、海绿石、石英、云母等。

硅藻土为白色或浅黄色，质轻，比密度0.4～0.7，孔隙度大（可达90%～92%），吸收性强，粘舌，具典型的硅藻生物结构，一般不显层理，有时可见薄水平层理。

②硅藻岩，由硅藻土硬结转变而来，孔隙度较硅藻土低，但仍具多孔构造，比密度0.8～1.4，颜色较浅，一般也较疏松，由细小棱角状或小球状的蛋白石组成。

③蛋白岩，主要成分为蛋白石，它与其他生物成因的硅质岩不同之处是很少含硅质生物遗骸，致密，较坚硬，贝壳状断口，孔隙度极小，比密度1.1～1.8，层理不显著。

④碧玉岩，主要由自生石英、玉髓组成，常含氧化铁、有机质等混入物，故易呈各种色彩，隐晶质或胶状结构，条带状或层状构造。岩石致密坚硬，断口呈贝壳状。

⑤燧石岩，是最常见的一种硅质岩，主要由微晶石英、蛋白石和玉髓组成，致密、坚硬、具贝壳状断口，颜色多为灰色、黑色，常呈层状、条带状、凸镜状或结核产出。

硅质岩在工业上有多种用途，如硅藻土在制糖、食品和石油工业中作为漂白剂，板状硅藻土和蛋白土可作吸收剂，硅藻土和板状硅藻土可作绝热和绝音的材料，燧石可作为研磨原料，有的可作油石，碧玉岩是最好的细工石料，色彩美者可作宝石。

5. 磷质岩

通常把 P_2O_5 含量达5%～8%的沉积岩称为磷质岩，磷质岩亦称磷块岩或磷灰岩，当含 $P_2O_5>12\%$ 时，即可作磷矿开采，主要矿物有胶磷矿、磷灰石等。具生物结构、化学结构、鲕粒

结构等，呈层状、结核状产出。

6. 碳酸盐岩

碳酸盐岩主要由碳酸盐矿物（方解石、白云石）组成，在地壳中的分布仅次于粘土岩和碎屑岩，占沉积岩总量的20%，据统计，碳酸盐岩在我国约占沉积岩总面积的55%，特别在西南、中南地区很发育，且时代愈老愈多。

①石灰岩，由结晶细小的方解石组成，常含少量白云石、粘土、菱镁矿及石膏等混入物，颜色常为浅灰色、灰色至灰黑色、黑色，亦有浅黄色、浅红色，加冷稀盐酸强烈起泡为其显著特征，肉眼无法区别其结晶颗粒大小时，就表现为致密块状岩石。

石灰岩的形成有化学的和生物的两种作用，化学作用主要是由于风化作用产生的碳酸盐溶液，当介质环境发生变化，使 $CaCO_3$ 达到过饱和而沉淀。生物作用是由于生物吸收水中的 $CaCO_3$ 组成骨骼和贝壳，当生物死亡后，骨骼和贝壳堆积而成为石灰岩。

根据石灰岩的成因、结构、构造可分为：碎屑石灰岩（呈碎屑颗粒状），鲕粒石灰岩（含鲕粒>50%以上），生物石灰岩（生物颗粒大于50%），生物礁石灰岩（由造礁生物组成）等等。

②白垩，白垩是一种成分很纯（$CoCO_3$90%以上）的石灰岩或生物微晶灰岩，它是富含方解石软泥的原生堆积体，保持着它的原生孔隙及硬度，含有相当多的藻类，有孔虫生物遗体，及极少量的碎屑石英、粘土、黄铁矿、海绿石等矿物。通常呈白色，有时为灰色、淡黄或淡绿色，遇冷稀盐酸强烈起泡，疏松土状，能染手。根据对其中的软体动物群的研究，它的堆积深度是在海水180m附近。

③白云岩，由含量在50%以上的白云石所组成的岩石称白云岩。另外，尚含少量方解石、石膏、菱镁矿及粘土等。加冷稀盐酸不起泡或起泡极微弱。颜色一般为白色、淡黄白色。肉眼观察呈粒状和致密状岩石，具有粗糙的断面。在表面常被风化成白云石小菱面体的淡白色粉末所覆盖。

白云岩的生成可以是纯化学沉淀而成，也可以是镁的氢氧化物在灰质沉淀过程中，发生交代而生成的。

碳酸盐本身就是很有价值的矿产，广泛用于冶金、建筑、化工、农业等方面，同时，它往往与铁、锰、磷、铅、锌、汞、稀有放射性元素以及非金属矿产（如石膏、岩盐、钾肥）直接有关，与石油、天然气关系更密切。

7. 盐岩

是一种纯化学成因的岩石，是由易溶于水的钾、钠、钙、镁的卤化物和硫酸盐，因蒸发作用使之沉淀而形成的，故又称为蒸发岩。

盐岩主要矿物成分是：石盐、钾盐、光卤石、泻利盐、芒硝、石膏、硬石膏等。混入物有方解石、白云石、粘土、石英、长石、云母以及有机质等。

根据组成蒸发岩的主要矿物成分的不同，可分为石膏岩和硬石膏岩、石盐岩、钾镁盐岩等三类。

①石膏岩和硬石膏岩

它们既是岩石又是矿物，又由于石膏与硬石膏是互相可以转变的两种矿物（硬石膏受水作用，变为石膏，体积膨大20%），因此除了能组成单矿岩外，有时，则以石膏-硬石膏岩或硬石膏-石膏岩出现，混入物有粘土、石盐、白云石、天青石及碎屑物质。颜色为白色、青灰色、淡红等色，致密状结构，受重结晶作用之后呈纤维状、鳞片状、结晶粒状等结构。形成于大陆盐湖和泻

湖环境，呈层状、透镜状产于碳酸盐岩系或红层之中，我国湖北应城、南京汤山附近是有名的石膏产地。

石膏及硬石膏主要用来作为工艺品及建筑材料、水泥原料、造纸工业的填充剂，其他用途详见矿物学中关于石膏的描述。

②石盐岩

主要由石盐(NaCl)组成，可含其他氧化物、硫酸盐、粘土和有机质等。常与石膏、硬石膏共生，石盐无色透明，常因含 F、Br、Re 稀土等元素而呈现特殊的灰、蓝、红、褐等颜色，形成于干旱湖泊地区。

石盐是人类生活不可缺少的食盐的原料，也是极其重要的化工原料。

③钾镁盐岩

包括钾盐岩、光卤石岩等。

钾盐岩，主要由钾盐(15%～40%)和石盐(25%～60%)及少量硬石膏、粘土和其他混入物组成，岩石呈乳白色、红色和红褐色，质柔软，有涩咸味，常具明显的层理。

光卤石岩，主要由光卤石(40%～80%)和石盐(18%～50%)所组成，另含少量硬石膏、粘土，岩石有苦咸味。

钾盐岩是提取钾的重要原料，用于制作农肥。

8. 可燃性有机岩

是主要的燃料物质，又称为燃料矿产。主要是由含碳、氢、氧、氮的有机化合物组成的岩石，它是埋藏于地层中的植物或动物的残骸，经过一定的作用形成的。本类岩石包括固体的煤、油页岩、沥青质岩等，液体的石油和气体的天然气。此类岩石由于与本专业关系不大，故详介从略。

6 变 质 岩

6.1 变质作用与变质岩的基本概念

无论是岩浆岩或是沉积岩，它们都是地壳发展过程中某一历史阶段的产物，其所处的平衡状态和稳定性都是相对的、暂时的。在漫长的地质时代里，随着地壳的不断运动，它必然向前发展和变化，若它们随着地质历史的发展演变，下降到地壳深处，在温度升高、压力加大，并经常伴随着地壳运动和岩浆活动的情况下，原岩所处的物理化学环境发生了重大改变，为了适应新的环境，建立新的平衡，原岩的成分、结构、构造都必须发生变化，而形成一种新的岩石，那么，这种由地质内力作用使原来的固体岩石发生重新改造和变化的作用，称之为变质作用。

变质作用的范围，一种情况是在固态下进行的，即原岩基本上在封闭系统下，通过重结晶、化学元素的重组合而形成新矿物以及发生变形和破碎等变化，岩石总的化学成分不变，或者在变质作用中还伴随着不同程度的交代作用，使元素发生了带出或带入，从而改变了原岩的总化学成分，此时，已超出了封闭系统范围。另一种情况是在变质作用过程中，有少量的液态物质(汽水溶液)的参与，甚至在特殊的条件下，还可以形成局部流体物质(如混合岩化作用)。但就整体来说，变质作用基本上是在固态条件下进行的，这是与岩浆作用所不同的特点，同时，也不同于风化作用和沉积岩的成岩、后生作用。风化作用等是发生在地表或接近地表常温常压条件下，是属于外力地质作用。

由变质作用所形成的新的岩石称为变质岩，根据原来岩石种类的不同，变质岩可分为两大类：

由岩浆岩经变质作用后形成的变质岩称为正变质岩。

由沉积岩经变质作用后形成的变质岩称为副变质岩。

6.2 研究变质岩的意义

变质岩在地壳上分布十分广泛，在我国亦有大规模分布。变质作用同其他地质作用一样，乃是地壳发展演化的结果，因而对变质作用及其变质岩的研究，对于追溯一个地区地壳发展和演化的规律是有用的。变质作用又是重要的成矿作用，已经形成的矿床在变质作用影响下可发生强烈的改造。同时变质作用又可促成新矿床的形成。

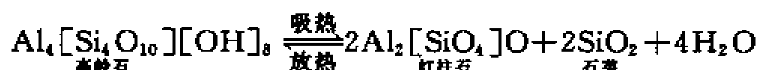
由变质作用所形成的矿床，分布广泛、矿种繁多，如铁、锰、铜、钴、铀、金、云母、菱镁矿、滑石、磷石灰、刚玉、石墨、石棉等。我国鞍山式铁矿，即前寒武纪的变质铁矿床，占全世界铁矿总储量的 2/3 以上，另外变质岩可以具有新的水文、工程地质性能，它是水文与工程地质工作中直接研究的对象之一。因此，对变质作用和变质岩的研究，掌握它的形成和分布规律，对扩大矿产资源，加速国民经济的发展，有重要的理论和实际意义。

6.3 变质作用的因素

地壳上各种岩石的变质，从根本上说是与各种内力地质作用相联系的，如岩浆侵入带来的热量和热液，必然要影响周围的岩石；构造变动的发生，必然要使岩石发生破碎变形，其结果都能引起岩石的变质。由此可以看出，地质作用是引起岩石变质的根本原因。但从另一方面来看，决定变质岩矿物组合及结构构造特征的直接因素则是变质时的物理化学环境，主要为温度、压力及具有化学活动性的流体等，它们是地质环境的具体体现，下面就着重讨论这些因素。

6.3.1 温度

在变质作用中，温度是一个极为重要的因素，大部分变质作用是在温度升高的情况下发生的，如沉积岩中的蛋白石受热后可脱水重结晶而成石英，褐铁矿变成赤铁矿。又如高岭石在温度作用下，形成红柱石和石英的矿物组合，反应如下：



$$\underset{\text{高岭石}}{Al_4[Si_4O_{10}][OH]_8} \xrightleftharpoons[\text{放热}]{\text{吸热}} 2\underset{\text{红柱石}}{Al_2[SiO_4]O} + 2\underset{\text{石英}}{SiO_2} + 4H_2O$$

在此反应中，温度升高反应向右进行，即向着吸热方向进行，生成吸热的矿物组合，温度降低则引起放热反应。

由此可知，温度的变化可决定变质作用的方向，另外，实验证明对含水矿物的不断加热，将伴随结构水的脱出，即随着温度的升高，变质作用的结果形成不含水的相对高温的矿物组合。反之则形成含水的相对低温的矿物组合。

温度所引起的变质作用主要表现为：

①温度升高，可以促使岩石中的矿物发生重结晶作用，使矿物颗粒由细变粗，引起岩石结构、构造发生改变，而岩石组分基本不变。

②温度升高，增加岩石中化学元素的活动性，加速化学反应，引起元素的重新组合和重新排列，导致岩石的矿物成分和结构构造都发生改变。

至于引起变质作用的热源问题，目前一般认为有：

①岩浆熔融体所带来的热，这为岩浆侵入体周围经常见到接触变质岩石所证实。

②地热，按地热增温率，在恒温层以下每加深 100m，温度增加 3℃，但单纯地热是不足的，需要其他热能来源叠加起来，才会引起变质作用。

③由构造作用产生的热能，构造作用使岩层受力产生破碎或滑动，可产生摩擦热，摩擦热能导致矿物的重结晶，在极少的情况下，还能使岩石产生局部熔化现象。

④岩石中所含放射性元素蜕变放出的热能。

⑤地壳中物质相转变释放出的热能。

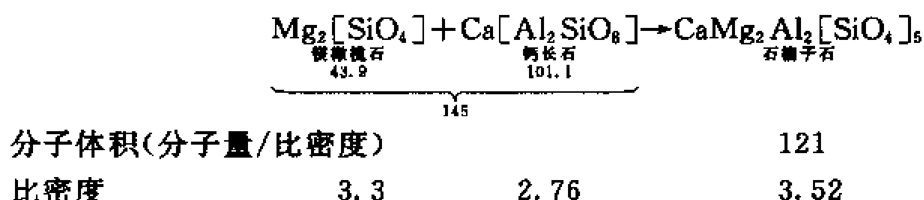
地质作用的温度范围，大致介于 250 ～800℃之间。

6.3.2 压力

压力是引起岩石变质的又一个重要因素，可分为均向压力（静水压力）、粒间流体压力和定向压力（应力）。

1. 均向压力（静水压力）（P_L）

一般指由上覆岩层的负荷重量所引起的压力，因而可以认为均向压力是深度和上覆岩层比密度的函数，均向压力不仅可以引起机械效果，如使岩石减少孔隙，变得致密坚硬，而且在控制矿物的重结晶以及熔化上也是重要的。最主要的表现是，在一定的温度下，由于均向压力的增加，往往形成比密度较大、分子体积较小的矿物。例如比密度为 3.1 的红柱石当压力增大后变成比密度为 3.6 的蓝晶石，又如辉长岩中的钙长石和橄榄石，在大的压力下，可反应形成分子体积小、比密度大的石榴子石，反应如下：



反应后形成的石榴子石的分子体积 121 比反应前镁橄榄石和钙长石分子体积之和 145 减少了 24，而比密度却增大了。

2. 粒间流体压力（P_f）

粒间流体主要由岩石颗粒间存在的挥发分，特别是 H_2O 和 CO_2 所引起（以 P_{H_2O} 和 P_{CO_2} 表示）。在区域变质情况下，深度一般超过 10km，裂隙节理不发育，所以 $P_f = P_L$（封闭系统）。绝大部分的脱水和碳酸盐的变质反应是在这种情况下进行的。例如：



粒间流体压力的作用如下：

①能够影响变质作用的温度，如上式若 CO_2 增大时，说明 P_{CO_2} 也大，则静水压力也大（否则 CO_2 全逸出了），反应向方解石和石英方向进行（放热反应）。若 CO_2 减少时，说明 P_{CO_2} 也小，则静水压力亦小，因此 CO_2 逸出的多，则反应向硅灰石方向进行（吸热反应）。

②粒间流体压力对岩石的重结晶可起催化剂的作用。

③对某些含结构水的矿物的分解则起抑制作用，即 P_{H_2O} 增大时，利于发生水化反应，P_{H_2O} 减少时，利于发生脱水反应。

3. 定向压力（应力）

主要是由于构造运动或岩浆活动而产生的侧向挤压力，岩石在定向压力的作用下，当超过其弹性极限时可发生变形，而当超过其强度极限时则发生破碎，使岩石产生节理、裂隙或形成劈理构造等。组成岩石的矿物在定向压力作用下，也会发生变形、破裂及光学性质上的改变，导致岩石在结构、构造上的变化，形成一些特征的变质岩结构构造，如云母的扭折、石英的压碎、波状消化、由一轴晶变成二轴晶等。

另外，定向压力可促进粒间流体的活动，从而加速变质作用进行，大大提高变质反应的强度。

在变质作用中，定向压力的分布一般接近地表较强，随地壳深度增加而减弱，其绝对强度目前还没有可靠资料。

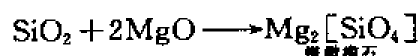
6.3.3 具有化学活动性的流体

化学活动性的流体，通常指的是汽态或液态的水溶液，水溶液中经常含有 CO_2、H_2O 以及 O_2、F_2、Cl_2、B 等挥发性物质，这些物质在温度升高的情况下，化学性质变得很活泼，它们在变

质作用中，起着重要的作用，具化学活动性的流体来源于存在于岩石孔隙及裂隙中的水溶液和由岩浆侵入或喷发等带来的挥发分及热液。

当这些流体在岩石孔隙和裂隙中由于压力差或溶液中活动组分的浓度差而引起流动时，对周围岩石发生交代变质作用，形成与原岩性质迥然不同的变质岩石。具体说来流体的作用有以下几点：

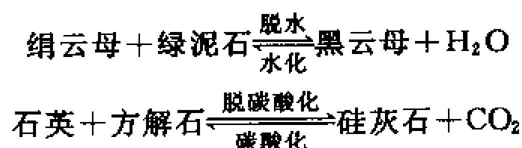
①首先在变质反应中起着粒间溶液的作用，成为加速矿物间化学反应的溶剂和催化剂，这种作用可以通过人工合成镁橄榄石实验得到证明：



上述反应，若在干燥情况下进行，温度要达 1000℃，4 天内只能形成 26%的镁橄榄石，如果在有 H_2O 参与的情况下，温度只需 450℃，几分钟反应就进行得极完全。

②在变质反应中，还往往起着组成矿物活动组分的作用，特别是 H_2O 本身可加入到矿物组成中去，形成含氢氧根的矿物，从而控制变质反应进行的方向。

如岩石中的绿泥石与绢云母反应时，将形成黑云母并析出水，其反应就是脱水作用，若反应向相反方向进行则为水化作用。又如方解石和石英生成硅灰石的反应，则为碳酸化及脱碳酸化作用，其反应式如下：



上述反应都是变质作用中常见的变化，可以看出，它们除与温度压力有关外，还与变质过程中 H_2O 和 CO_2 性质有关。

③在交代作用过程中，水溶液是物质组分带出带入的媒介物，依靠水中溶解的，通过溶解和置换来交代原来的矿物，例如基性岩浆岩中的镁橄榄石在含 SiO_2 的水溶液作用下，则可被交代形成蛇纹石，反应如下：



在变质作用过程中，上述变质因素不是孤立的，通常都是同时存在、互相配合和互相制约的。但在一般情况下，温度常作为主导因素，常与静水压力及应力共同存在，互相配合。而具有化学活动性的流体，虽对变质作用有很大的影响，但它往往不是一个独立的因素，必须依赖于温度、压力的配合。

6.4 变质岩的物质成分

6.4.1 变质岩的化学成分

由于变质岩是原来的岩石经变质作用所形成，所以变质岩的化学成分和原岩的化学成分密切相关。对于没有发生交代作用所形成的变质岩，其化学成分(除水和碳酸外)和原岩化学成分几乎相同，并不发生明显的变化，即它们之间有继承性，当有交代作用进行时，由于化学元素的带出和带入，其化学成分可以发生很大的改变，并随着交代作用的性质和强度不同而变化。因此，变质岩的化学成分又具有多样性。

总的看来，变质岩的化学成分仍主要由 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、FeO、MnO、MgO、CaO、K_2O、Na_2O、H_2O、CaO 以及 TiO_2、P_2O_5 等主要造岩氧化物组成，但在不同的变质岩中其含量变化甚大。

①SiO_2 在正变质岩中，一般变化于 35%～78%之间，而在副变质岩中，则可从几乎为零至高达 90%以上。例如由石灰岩变质形成的大理岩中，几乎不含 SiO_2，而由石英砂岩等变质形成的石英岩中可含 SiO_2 达 90%。

②Al_2O_3 在正变质岩中变化于 0.86%～28%之间，一般低于 20%，而某些副变质岩中可达 17%～40%，由泥质岩（副变质岩）变成的结晶片岩、千枚岩及部分片麻岩中，常含较多的 Al_2O_3，即 $Al_2O_3 > K_2O + Na_2O + CaO$，而这种情况在岩浆岩中较为少见。

③$FeO + Fe_2O_3$ 在正变质岩中一般为 3%～15%，在副变质岩中则含量不定，有时可以很高，如磁铁矿。

④$CaO + MgO$ 在正变质岩中通常小于 30%，极少超过 47%（岩浆成因的碳酸盐除外，其 $CaO + MgO$ 可超过 50%），而副变质岩中 CaO 则可高达 56%，MgO 可达 47%。

⑤碱质含量不高，特别是 Na_2O（少数例外）比较低，常为 $K_2O > Na_2O$，而岩浆岩中则相反，经常是 $Na_2O > K_2O$。

以上化学成分的特点，完全和变质岩的矿物成分特点相对应。

对变质岩的化学成分进行研究是很重要的，因为它常作为恢复变质岩原岩性质的重要依据，同时，对变质岩的分类、变质成矿作用和变质岩成因等方面的研究也是必不可少的。

6.4.2 变质岩的矿物成分

变质岩的矿物成分既决定于原岩的化学成分，也和形成时的物理化学条件密切相关，原岩的化学成分是形成变质岩的物质基础，而物理化学条件则是变质岩出现什么矿物或矿物组合的决定条件。因此，变质岩的矿物成分也和其化学成分一样，也有其继承性——在变质作用过程中，保留下来的原岩中的稳定矿物和多样性——在变质作用过程中，新生成的变质矿物。所以，变质岩的矿物成分较之岩浆岩和沉积岩更为复杂多样。

现把变质岩的矿物成分和岩浆岩、沉积岩的矿物成分的对比列于表 3.6.1。

表 3.6.1 岩浆岩、沉积岩和变质岩矿物对比表

岩浆岩、沉积岩、变质岩均有的矿物	主要在岩浆岩中出现的矿物	主要在沉积岩中出现的矿物	主要在变质岩中出现的矿物
石英　赤铁矿　钾长石 钛铁矿　白云母　磷灰石 黑云母　榍石　斜长石 锆石　角闪石　磁铁矿 辉石　橄榄石　金红石等	磷石英　霞石　白榴石 鳞方石　方钠石　透长石 歪长石　霓石　玄武闪石 等	蛋白石　玉髓　粘土矿物 海绿石　水铝石　褐铁石 石膏　盐类矿物等	钠云母　帘石类　符山石 方柱石　透闪石　次闪石 阳起石　硅灰石　蓝闪石 软玉　硬玉　硬绿泥石 红柱石　蓝晶石　矽线石 刚玉　石墨　蛇纹石 滑石　堇青石　十字石 硅镁石　方镁石

从表中可知变质岩矿物具如下特点：

①组成变质岩的矿物，大致可以分为两部分：一部分是与岩浆岩和沉积岩共有的矿物，如石英、钾长石、白云母等。另一部分是变质岩所特有的矿物如红柱石、蓝晶石、阳起石、蛇纹石、

滑石等。

②变质岩中所特有的变质矿物如果在岩石中较多出现，则反映原岩已经变质，应归于变质岩类。

③变质岩由于常受定向压力的影响，所以广泛发育纤维状、鳞片状、长柱状、针状的矿物，且常见它们作有规律的定向排列，如阳起石、透闪石、云母、滑石、硅线石等。

④变质岩矿物中同质多象变体较为发育，如红柱石、蓝晶石，矽线石则为 Al_2O_3、SiO_2 的同质多象变体。

⑤变质矿物中常常含有较多的包裹体，如红柱石中常含有碳质包裹物，十字石中常有碳质、石英等包裹体。

⑥变质岩矿物的变形特点远较岩浆岩、沉积岩要显著得多。变质矿物经常出现晶形弯碎、裂纹，且常常具有波状消光等现象。

变质岩中的矿物成分，按其成因可分为：

①新生矿物(变晶矿物)

在变质作用过程中新生成的矿物。如粘土岩经过变质后生成的红柱石。

②原生矿物

在变质作用过程中保留下来的原岩中的稳定矿物。如云英岩中的一部分石英就是花岗岩在云英岩化过程中保留下来的原生矿物。

③残余矿物

在变质作用过程中残留下来的原岩中的不稳定矿物。如花岗岩在云英岩化过程中残留有不稳定的长石。

新生矿物、原生矿物对于一定的变质条件下都是稳定存在的，亦可称为稳定矿物。

研究变质岩的矿物成分的特征，对恢复原岩的化学成分特点和判断变质过程中的物理化学条件是极为重要的。

6.5 变质岩的结构和构造

变质岩的结构、构造指的是变质岩的构成方式，其概念与岩浆岩一样。结构是指组成岩石的矿物颗粒大小、形状及其彼此之间关系的特点，它着重于矿物个体的性质和特征。构造是指组成岩石的各种矿物在空间的分布和排列状况，着重于矿物个体在方向和分布上的特征。

变质岩的结构、构造既可继承保留原岩的结构和构造特性，同时也可在不同的变质作用中形成新的结构和构造，因此，变质岩的结构、构造十分多样，且往往变化较大。

6.5.1 变质岩的结构

变质岩的结构类型很多，按其成因可分 4 大类，即变晶结构、变余结构、碎裂结构、交代结构。

1. 变晶结构

变晶结构是变质岩最基本最重要的结构，它是原岩在固态下通过重结晶作用所形成的结构总称。由于原岩是在固态下进行重结晶，各种矿物几乎是同时形成的，故矿物的晶形多不规则，往往是颗粒间互相镶嵌或互相包裹，有时还有一定的方向性，这是与岩浆岩的结晶结构所

不同的特点（岩浆岩的结晶结构一般是先形成的矿物，自形程度比后生成的矿物高），根据变晶矿物的自形程度、颗粒大小和形状可进一步划分出下列结构：

①根据矿物的自形程度可分为自形变晶结构、半自形变晶结构、他形变晶结构。

②根据矿物颗粒的绝对大小分为粗粒变晶结构（颗粒平均直径＞3mm）、中粒变晶结构（颗粒平均直径 1～3mm）、细粒变晶结构（颗粒平均直径 0.1～1mm）、显微变晶结构（颗粒平均直径＜0.1mm）。

③根据矿物颗粒的相对大小分为等粒变晶结构（组成岩石的大部分矿物颗粒大小基本相等）、不等粒变晶结构（岩石中的主要矿物大小不等，粒度为连续变化，又称系列变晶结构）、斑状变晶结构（其特点是组成岩石的矿物颗粒大小相差悬殊，大的称为变斑晶，细小的称为基质，其粒度的变化是显著的）。

④根据矿物的结晶习性与形态可分为粒状变晶结构，岩石由大致等轴形矿物颗粒所组成。又可根据矿物颗粒界面的形状进一步细分为：镶嵌粒状变晶结构——矿物颗粒呈简单多边形，接触界线平直，紧密镶嵌，及齿形粒状变晶结构（缝合线结构）——矿物颗粒外形不规则，接触界线呈锯齿状。另外，如粒度相等为等粒状变晶结构，大小不等为不等粒状变晶结构；鳞片变晶结构，变晶矿物呈两向延长的鳞片状，这些鳞片矿物可以定向排列，也可无向排列；纤状变晶结构，变晶矿物呈一向延长的柱状、针状或纤维状。

⑤根据矿物颗粒的相互关系可分为包含变晶结构（较大的变晶矿物中，包裹了一些不定向的细小矿物颗粒）、残缕结构（当较大的变晶矿物中包裹的细小矿物颗粒作平行定向排列，并与变晶基质中的同种矿物断续相连时）、次变边结构（一种或数种矿物围绕某种矿物晶体呈放射状或蠕虫状排列，且两者在晶形及光性上都不连续）。

2. 变余结构

原岩在变质作用过程中，由于重结晶作用不完全，保留原岩部分结构特征时，称为变余结构或残留结构，其命名只要在原岩结构名称前加上“变余”二字就可。如原岩为岩浆岩具斑状结构，它的变余结构可称变余斑状结构。又如原岩为沉积岩具砾状结构，它的变余结构可称变余砾状结构。原岩为变质岩具变晶结构，它的变余结构可称变余变晶结构等等。

3. 碎裂结构

是指由于动力变质作用使岩石发生机械破碎而生成的结构，称为碎裂结构。机械破碎是指矿物发生弯曲、破裂、断开、研磨成不规则的小碎块或粉末状，当受强压力作用时又被粘结在一起，按其破碎程度的不同可分成下列几种：

①碎裂结构　在应力作用下，岩石中的矿物被破碎成外形不规则的带棱角的碎屑，碎屑之间为少量破碎形成的细粒及粉末状物质所充填，碎屑的边缘多呈锯齿状，而矿物碎屑常具有裂纹、波状消光和扭曲变形等现象。

②碎斑结构　在受强应力的作用后，矿物颗粒大部分被压碎成细粒至隐晶质的碎屑，但其中尚残留有部分较大的矿物碎粒，很像斑晶，故称为碎斑结构。碎斑形状不规则，具撕碎状边缘、裂纹，波状消光发育。

③糜棱结构　在更强应力作用下，岩石中矿物颗粒几乎全部破碎成微粒状（或细粒至隐晶质粉末）称糜棱结构，破碎的微粒往往具明显的定向分布，其中可残留少量稍大的矿物碎块，但常被磨圆呈球粒状（常为石英、长石等），当碎粒直径小于 0.1mm 时，可称超糜棱结构。

4. 交代结构

是交代作用所形成的各种结构总称，这种结构是确定交代作用存在及性质的重要标志之一，也是区分变质岩中矿物世代的最重要依据之一，交代结构多出现在各种交代岩及混合岩中。

发生交代变质作用时，原岩中的矿物被取代、消失，与此同时形成新生矿物。这些作用既可以置换原有矿物，保持原岩的结构方式进行（如交代假象结构），也可以交代重结晶形成新矿物、新结构的方式进行，从而产生不同的交代结构。

常见的交代结构有：交代假象结构、交代蚕蚀及交代残留结构、交代穿孔及交代蠕虫结构、交代条纹结构、交代净边结构、交代斑状结构等。

6.5.2 变质岩的构造

变质岩的构造按其成因可分两类。

1. 变余构造

岩石经变质后，仍保留有原岩的构造特征称为变余构造，研究变余构造对查明、恢复原岩性质、特征有重要意义。

正变质岩中常见的变余构造有变余气孔构造、变余杏仁构造、变余流纹构造、变余枕状构造、变余斑杂构造等。

副变质岩中常见的变余构造有变余层理构造、变余斜层理构造、变余泥裂构造、变余波痕构造等。

2. 变成构造

经变质作用后形成的构造称变成构造，常见的主要类型有：

①斑点构造　在变质作用的初期，由于温度的升高，原岩中的某些成分（如碳质）首先集中凝结或起化学变化，形成斑点状的小矿物（其形状、大小可有不同）分布于岩石中，称斑点构造。斑点的成分常为碳质、硅质、铁质或红柱石、堇青石等的雏晶，基质的成分常为隐晶质，随着变质作用温度的升高，这些斑点可重结晶成变斑晶，并在岩石中呈瘤状突起，则称为瘤状构造。

②块状构造　组成岩石的矿物成分和结构都是很均匀、无定向排列。

③板状构造（劈理构造）　页岩或泥岩等柔性岩石受应力作用达一定程度常出现一组平行的破裂面（即劈理构造），原岩基本上没有重结晶，新生矿物很少。劈理面常平整光滑，有时有少量鳞片状绢云母、绿泥石出现。

④千枚状构造　岩石中小的片状矿物已基本重结晶，但仍不完全，初步具定向排列，使岩石呈薄片状，片理面上具丝绢光泽，还常见具挠曲和小褶皱，矿物颗粒细小，肉眼不能分辨。

⑤片状构造　是变质岩最典型最常见的构造，其特点是由片状、柱状或针状矿物（如云母、滑石、绿泥石、角闪石、矽线石等）和部分粒状矿物作平行排列而成，片理特别清楚。它与千枚状构造的区别是岩石的重结晶程度高，矿物颗粒较粗，用肉眼即可分辨。

⑥片麻状构造　岩石中主要为粒状浅色矿物（长石、石曲等）组成，相间的鳞片状、柱状深色矿物（黑云母、角闪石）呈条带状排列和分布，在岩石的外观上，构成一种黑白相间的断续层带状构造。

⑦条带状构造　岩石中矿物成分分布不均匀，表现为浅色矿物和暗色矿物，分别集中形成一定宽度的条带，交替出现，其成分较复杂。

⑧眼球状构造　在片麻岩构造中，常有一些颗粒粗大的浅色矿物（如石英、长石），被一些片状、柱状矿物所环绕，呈透镜状或扁豆状，沿片理方向排列，外形颇似眼球，故称眼球构造。

6.6 变质岩的分类

变质岩的岩性比岩浆岩和沉积岩都要复杂，成因也较多样，分类原则和具体分类目前尚未统一。

一般根据变质作用类型可将变质岩分为五大类：

(1)动力变质岩类。

(2)接触变质岩类。

①热接触变质岩类。

②接触交代变质岩类。

(3)区域变质岩类。

(4)混合岩类。

(5)交代变质岩类。

6.7 主要变质岩描述

1. 片麻岩

是一种变质程度比较深，具有片麻状构造的区域变质岩，具中粗粒鳞片粒状变晶结构。原岩为粘土岩、粉砂岩、砂岩和酸性、中酸性岩浆岩。片麻岩主要由长石、石英和黑云母、角闪石组成，有时暗色矿物为辉石，一般长石＋石英＞50％，长石含量＞25％或30％，黑云母＋角闪石＜30％(如果＞30％则逐渐过渡为片岩)。此外，有时尚含有少量的特征变质矿物，如矽线石、蓝晶石、石榴子石、堇青石等。

片麻岩与片岩的主要区别是，片麻岩具片麻状构造，片岩具片状构造，另外片麻岩中长石的含量必须＞25％～30％。

片麻岩可根据所含长石的种类，分为钾长片麻岩、斜长片麻岩两大类，然后再根据暗色矿物和特征变质矿物进一步分类命名，如黑云母斜长片麻岩、矽线石钾长片麻岩等，片麻岩的具体分类命名可参考表3.6.2。

表3.6.2 片麻岩分类表

长石＞25％～30％ / 主要暗色矿物	斜长石	钾长石	斜长石＋钾长石	长石类型未定
黑云母15％～30％	黑云母斜长片麻岩	黑云母钾长片麻岩	黑云母二长片麻岩	黑云母片麻岩
角闪石15％～30％	角闪石斜长片麻岩	角闪石钾长片麻岩	角闪石二长片麻岩	角闪石片麻岩
特征矿物＞15％	矽线石斜长片麻岩	矽线石钾长片麻岩	矽线石二长片麻岩	矽线石片麻岩

同时，也常引用以矿物成分与其相当的岩浆岩的名称来命名，如成分与花岗岩相当者，可称为花岗片麻岩，与正长岩相当者，称为正长片麻岩等。有时还可根据其构造特点命名，如眼球状片麻岩、条带状片麻岩等。

片麻岩是由各种不同成分的沉积岩和岩浆岩经区域变质作用而形成的，由岩浆岩变质而成的称正片麻岩，由沉积岩变质而成的称负片麻岩。区别正、负片麻岩，对解决变质岩的成因

和地质发展史都有重要意义。

片麻岩分布很广泛，在区域变质岩地区经常出现，变质的温度、压力范围也较宽，但主要是在温度中等至较高的条件下形成。

片麻岩主要用于建筑和铁路工程，但由于其中矿物排列成层易于风化而沿片理方向破碎，故其坚固性较花岗岩差。

2. 片岩

是具有明显片状构造的区域变质岩，常见的片状柱状矿物有云母、绿泥石、滑石、角闪石、阳起石、绿帘石等，其含量在30%以上，粒状矿物主要为石英和长石，总量<70%，其中以石英为主，长石含量少于25%～30%，岩石的重结晶程度比千枚岩高得多，具有较粗的鳞片变晶结构或纤状变晶结构，矿物成分肉眼可辨，有时含少量铁铝榴石、十字石、蓝晶石等特征变质矿物的变斑晶，可形成斑状变晶结构。

片岩的分类与命名，一般可按主要片状或粒状矿物的名称而定，如云母片岩、绿泥片岩、滑石片岩、角闪片岩等，如有特征变质矿物参加，则可加在前面，如十字石云母片岩，当有粒状矿物石英、长石存在时，则视其含量不同而分别命名，详见表3.6.3。

表3.6.3　片岩分类表

柱状片状矿物 粒状矿物	绢云母	绿泥石	白云母	黑云母	二云母（二者含量大致相等）	角闪石	特征变质矿物石榴子石、十字石、蓝晶石、矽线石等
长石＋石英<50%	绢云母片岩	绿泥石片岩	白云岩片岩	黑云母片岩	二云母片岩	角闪片岩	十字石黑云母片岩
长石＋石英>50%	绢云母石英片岩	绿泥石石英片岩	白云母石英片岩	黑云母石英片岩	二云母石英片岩	角闪石英片岩	十字石黑云母石英片岩

下面介绍几种常见片岩的岩性特征：

①云母片岩　是片岩中最常见的岩石类型，原岩主要为粘土岩和中酸性火山岩（凝灰岩），矿物成分以云母为主，其次有石英、斜长石、石榴石、蓝晶石、十字石等。具斑状变晶结构，云母片岩可分白云岩片岩（包括绢云母片岩）、黑云母片岩和二云母片岩。

②绿（色）片岩　原岩一般为中性至基性的火山岩、火山碎屑岩和钙质白云质泥灰岩等，经低级区域变质作用形成，为暗色至暗绿色具片状构造的区域变质岩的总称，主要由绿泥石、绿帘石、黝帘石、阳起石等绿色矿物和钠长石、石英、绢云母等组成，根据矿物组合不同，可分钠长绿泥片岩、绿帘绿泥片岩、阳起石片岩等。

③滑石片岩　通常是由超基性岩或富镁碳酸盐岩经低级区域变质作用的产物，主要由滑石组成，亦含少量的绿泥石、云母、碳酸盐类矿物等。颜色为淡绿色或灰白色，硬度低，有滑感，滑石片岩是主要的滑石矿石。滑石在油漆工业、橡胶工业、造纸工业中有广泛的应用。

④角闪片岩　是由基性岩和铁镁质泥灰岩经中级区域变质作用的产物，主要矿物成分是角闪石和石英，有时含少量斜长石、绿帘石、黑云母等，具片状构造，纤状变晶结构。

3. 板岩

是泥质、粉砂质或中酸性凝灰质岩石经轻微区域变质作用形成的具有板状构造的浅变质岩石，重结晶不明显或极轻微，新生矿物很少，镜下可见有泥质和部分绢云母、绿泥石、硅质，有时见有少量的白云母、黑云母、石英等，岩石为隐晶质致密状，为变余泥质结构。

板理面略具丝绢光泽，可沿板理剥成薄板，颜色常为灰色、绿灰色，因所含成分不同，还可出现不同的颜色，如含 Fe^{3+} 呈红色，含 Fe^{2+} 呈绿色，含碳质时可呈黑色，板岩可按颜色和所含杂质等进一步命名，如灰绿色板岩、钙质板岩等。

4. 千枚岩

原岩成分同板岩相似，经轻微区域变质而成的具千枚状构造的岩石，其变质程度比板岩稍高，在空间上常和板岩共生，并互相过渡，重结晶程度比板岩高，基本已重结晶，矿物组分主要为绢云母、绿泥石、石英、钠长石等，具细粒鳞片变晶结构，片理面具强丝绢光泽，面上常有皱纹状的波状起伏，颜色为黄褐色、灰绿色。

千枚岩可根据特征矿物和主要矿物、颜色进一步命名，如黄色绢云母千枚岩、灰绿色绿泥石千枚岩等。

5. 角闪岩

由基性岩(侵入岩、火山岩、火山碎屑岩)和富铁白云质泥灰岩在中至高温区域变质条件下形成，矿物成分主要由角闪石和斜长石组成，常含少量的石榴子石、黑云母、绿帘石、辉石、石英、榍石等，岩石的颜色比较深暗，一般为细粒及粗粒变晶结构，块状构造或微呈片状构造。

角闪岩进一步命名主要根据角闪石和斜长石的相对含量，当角闪石>50%、斜长石<50%时，称斜长角闪岩，当角闪石含量>85%称角闪石岩。

斜长角闪岩为重要的变质岩类型，其分布也很广泛，在区域变质岩发育地区常见它与片岩、片麻岩伴生一起。

6. 石英岩

由砂岩和硅质岩经区域变质作用重结晶形成，同时硅质成分的原岩由于热接触变质作用也形成石英岩，是主要由石英组成的浅色粒状岩石。

由于石英在温度作用下不易发生化学变化，在低温至高温的宽大范围内，主要引起重结晶作用，如原岩中含有钙、铁、泥质和碳质时，则在不同的温度条件下会出现反映该条件的变质矿物，如低温条件下出现绢云母、绿泥石，中温条件下出现白云母、黑云母、角闪石，高温条件下出现辉石等。其命名也以这些矿物作形容词，冠于基本名称之前，如绢云母石英岩、角闪石石英岩、辉石石英岩等。

石英岩具粒状变晶结构、块状构造，岩石致密坚硬，多呈浅色或白色。

石英岩分布很广，广泛应用于硅酸盐工业上，是制造陶瓷、玻璃、硅砖的重要原料，亦是优良的建筑和装饰材料。

7. 大理岩

俗称大理石，是一种主要由方解石、白云石等矿物组成的岩石，在区域变质作用下，由于重结晶而形成的变质岩。也有部分大理岩是在热接触变质作用下产生的，这类岩石具粒状变晶结构、块状构造，有时具条带状构造，颜色常为白色，含杂质时可出现不同的颜色及花纹，根据方解石、白云石的含量，可分为以下 4 种主要类型，见表 3.6.4。

表 3.6.4 根据方解石、白云石含量的大理岩分类

矿物含量(%)	方解石>90%	方解石+白云石>90%		白云石>90%
		方解石>白云石	白云石>方解石	
岩石名称	大理岩	白云岩大理岩	钙质白云石大理岩	白云石大理岩

由于原岩所含杂质和变质条件的不同，大理岩中还可能出现一些其他变质矿物，如低温变

质条件出现蛇纹石、滑石、绿帘石、透闪石、阳起石，中温条件下出现符山石、钙铝榴石，高温变质条件出现镁橄榄石、透辉石等。

大理岩分布广泛，云南大理县点苍山以盛产美丽花纹的大理岩而闻名，洁白的细粒的大理岩(汉白玉)和常有各种花纹的大理岩(因含蛇纹石、透闪石等)是高级的建筑材料和各种装饰石料等。

8. 蛇纹岩

主要是由超基性岩受高—中温热液交代作用，使原岩中的橄榄石和辉石发生蛇纹石化所形成。蛇纹石化作用也可由区域变质作用和动力变质作用产生，超基性岩转变成蛇纹岩的过程，主要是由橄榄石、辉石等铁镁矿物受热液作用发生水化、硅化、碳酸盐化的结果，其反应式如下：

水化作用

$$\underset{\text{橄榄石}}{6Mg_3C_8[Si_2O_8]}+12H_2O+O_2 \longrightarrow \underset{\text{蛇纹石}}{3Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8}+\underset{\text{磁铁矿}}{2Fe_3O_4}$$

硅化作用

$$\underset{\text{镁橄榄石}}{3Mg_2[SiO_4]}+4H_2O+SiO_2 \longrightarrow \underset{\text{蛇纹石}}{Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8}$$

碳酸盐化作用

$$\underset{\text{镁橄榄石}}{4Mg_2[SiO_4]}+4H_2O+2CO_2 \longrightarrow \underset{\text{蛇纹石}}{Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8}+\underset{\text{菱镁矿}}{2MgCO_3}$$

$$\underset{\text{透辉石}}{6CaMg[SiO_6]}+4H_2O+6CO_2 \longrightarrow \underset{\text{蛇纹石}}{Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8}+6CaCO_3+8SiO_2$$

蛇纹岩一般呈黄绿色至暗绿色，致密块状，质较软，略具滑感。有时由于色调深浅的不均一，常形成斑驳状花纹，很像蛇皮，故名蛇纹岩，矿物成分简单，主要由各种蛇纹石组成，次要矿物有磁铁矿、铬铁矿、钛铁矿、水镁石及其他镁碳酸盐等。橄榄石和辉石常呈残余矿物出现。其他尚有少量直闪石、阳起石、透闪石、滑石。蛇纹岩常呈隐晶质结构，镜下观察可见纤状变晶或鳞片变晶结构以及变余粒状结构，构造多为块状、带状、片状、透镜状、角砾状等。

蛇纹岩的分布较广，与其有关的矿产有铬、镍、钴、铂、石棉、滑石、菱镁矿等，蛇纹岩本身又是良好的化肥原料。

9. 次生石英岩

是中酸性次火山岩、火山岩和火山碎屑岩在硫质火山蒸气和中低温热液的交代作用下蚀变所形成，它的形成过程主要是原岩中的钠、钾、镁、钙等氧化物被带出，而使较稳定的硅、钛、铝等氧化物相对富集，从而形成稳定矿物石英及一些富铝矿物刚玉、红宝石等。

次生石英岩一般为浅灰或深灰色、灰绿色等，隐晶质至细粒变晶结构，镜下可见变余斑状结构，块状构造或变余流纹构造。矿物成分主要为石英(蛋白石及玉髓)，通常占70%~75%，及绢云母、明矾石、高岭石、红柱石、水铝石、叶蜡石，次要矿物有刚玉、黄玉等，此外，亦有少量的黄铁矿、赤铁矿等。

次生石英岩分布较广泛，与其有关的矿产有非金属原料(明矾石、高岭石、叶蜡石、水铝石、刚玉、红柱石等)以及镍、铅、锌、金、银等多金属矿床。

10. 矽卡岩

矽卡岩是在中酸性侵入岩与钙镁质碳酸盐类岩石的接触带，经气成热液交代作用形成的岩石，由钙硅酸盐矿物组成的矽卡岩称钙质矽卡岩，其原岩主要为石灰岩，由富镁的硅酸盐矿物组成的矽卡岩称镁质矽卡岩，其原岩为白云岩，有时岩体的边部也发生蚀变形成矽卡岩，称

内矽卡岩，而将围岩中的矽卡岩通称为外矽卡岩。

矽卡岩在形成过程中，物质组分的迁移是很剧烈的，岩浆中的 Si、Al、Fe 等元素部分转入围岩，围岩中部分 Ca、Mg 转入岩浆，从而形成在矿物成分及结构构造上均比较特殊的一类变质岩。

矽卡岩的颜色一般比较深，常呈暗色、暗绿色，少数呈浅灰色，常具有典型的不等粒变晶结构、斑状变晶结构及包含变晶结构等。矿物晶形一般完好，比密度较大，构造多为块状、斑杂状、条带状等。

根据围岩成分的不同，矽卡岩可分成两大类型，即钙矽卡岩和镁矽卡岩。

钙质矽卡岩的主要矿物成分为石榴子石（钙铝—铁铝石榴石）、辉石（透辉石—钙铁辉石）、硅灰石、符山石所组成，有时尚有晚期形成的热液矿物如透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石等，石英、方解石、云母等也较为常见。金属矿物以磁铁矿、赤铁矿最常见，其次还有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、白钨矿、辉钼矿等，它们常呈不同组合出现于各类矽卡岩中。与钙质矽卡岩有关的矿产比较多，有铁、铜、铅、锌、钨、锡、铌、铋、铍等。

镁质矽卡岩的主要矿物成分为镁橄榄石、金云母、硅镁石、透辉石、光晶石、含硼矿物、金属矿物等，与镁质矽卡岩有关的矿产有磁铁矿、含稀土（铈组）的磁铁矿床、硼磷、金云母等。

第四篇　岩 相 分 析

1　晶体光学基础

1.1　光的波动性

大量物理学的科学实验早已证明，光和无线电波一样是一种电磁波。电磁波是电磁振动(变化的电磁场)在空间的传播过程。电磁振动方向垂直其传播方向，即它们是横波。

整个电磁波是一个广阔的区段。它包括波长较长的无线电波，直至波长最短的 γ 射线。将各种波长的电磁波按其波长顺序排列，即构成电磁波谱(图 4.1.1)。

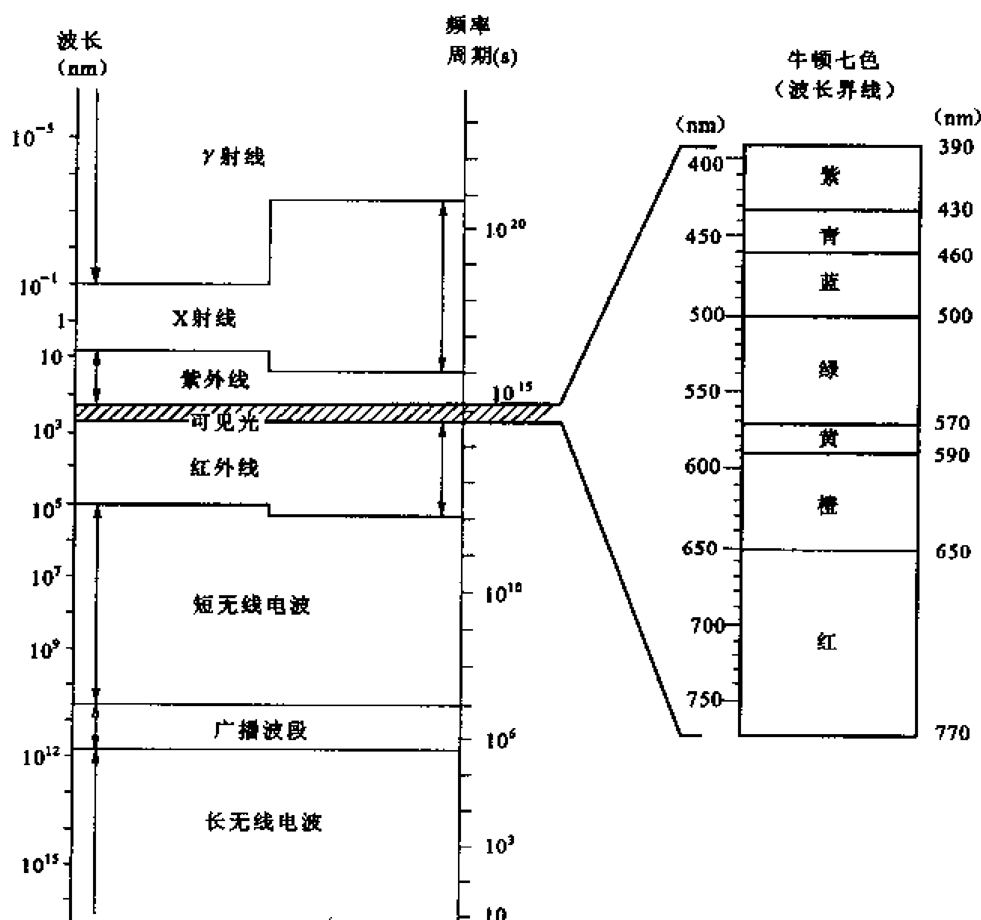


图 4.1.1　电磁波谱

(据 E. E. Wahlstrom，1979 年，修改)

从电磁波谱可看出，可见光波仅仅是电磁波谱中很窄的一个小区段，其波长范围大致为 390～770nm。可见光波中频率不同的光波呈现不同的颜色。图 4.1.1 右侧表示各种色光波长的大致范围。波长由长至短，相应的颜色由红经过橙、黄、绿、蓝、青连续过渡到紫色。我们通常所见的"白光"，实质上是各种色光组成的混合光。

光波的波长单位通常用纳米(nm)或埃(Å)。它们与其他常用长度单位的换算关系为：

$$1\text{ 纳米(nm)}=10\text{ 埃(Å)}=10^{-3}\text{ 微米(}\mu\text{m)}$$
$$=10^{-6}\text{ 毫米(mm)}=10^{-7}\text{ 厘米(cm)}$$

1.2 光的折射及全反射

1.2.1 光的折射及折射率

当光波从一种介质传到另一种介质时，在两种介质的分界面上将发生反射及折射现象。反射光按反射定律返回原介质，折射光按折射定律折射进入另一介质。透明矿物的研究，主要涉及折射光。因此，我们着重介绍折射光所遵循的规律。下面介绍根据惠更斯原理证明折射定律。

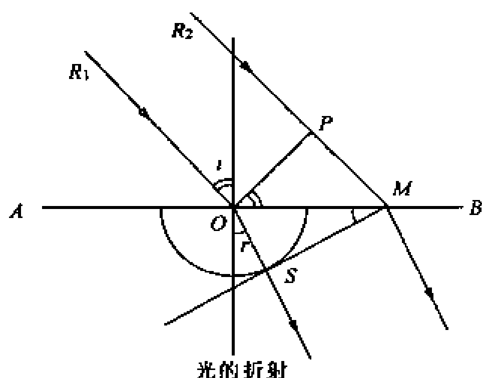


图 4.1.2 光的折射

图 4.1.2 中 AB 代表两种不同介质的分界面(垂直纸面)，界面的垂线称法线。设有一平行光束倾斜射向界面，R_1、R_2 为该光束中的两条代表光线。设 i 代表入射光与法线的夹角(入射角)，r 代表折射光与法线的夹角(折射角)。设 V_i 代表光波在入射介质中的传播速度，V_r 代表光波在折射介质中的传播速度。设在 t_1 瞬间，入射光束的波前到达 OP 面。根据惠更斯原理，波前 OP 面上的每一点均可视为发射子波的新波源。当光线 R_1 从 O 点进入折射介质时，光线 R_2 仍在原入射介质中传播。至 t_2 瞬间，光线 R_2 到达界面上的 M 点，R_1 已在折射介质中传播了 OS 距离，$OS=V_r(t_2-t_1)$，即 R_1 从 O 点发出的子波已在折射介质中形成以 OS 为半径的一个半圆波面。从 M 点向此半圆波面作一切线与波面相切于 S 点。MS 即为 t_2 瞬间折射光束的波前，OS 为折射光束的传播方向。

图 4.1.2 的 $\triangle OMP$ 中，$\angle POM=i$

$$MP = OM\sin i \tag{1}$$

$\triangle OSM$ 中，$\angle OMS=r$

$$OS = OM\sin r \tag{2}$$

以(1)式除(2)式：
$$\frac{MP}{OS}=\frac{OM\sin i}{OM\sin r}$$

因 $MP=V_i(t_2-t_1)$，$OS=V_r(t_2-t_1)$

代入上式即得：
$$\frac{V_i(t_2-t_1)}{V_r(t_2-t_1)}=\frac{\sin i}{\sin r}$$

即
$$\frac{V_i}{V_r}=\frac{\sin i}{\sin r}=N=\frac{N_r}{N_i} \tag{3}$$

(3)式即为折射定律。当两个介质一定时，N 为一常数，称为第二介质(折射介质)对第一介质(入射介质)的相对折射率。如果入射介质为真空(或空气)，则 N 值称为折射介质的绝对折射率，简称折射率。

从(3)式可以看出，光波在介质中的传播速度愈大，该介质的折射率愈小；反之，光波在介质中的传播速度愈小，其折射率愈大。即介质的折射率值与光波在该介质中的传播速度成反

比(即 $V_i/V_r=N_r/N_i$)。

一般说来,光在真空中的传播速度最大。光在空气中的传播速度与在真空中的传播速度几乎相等,通常把空气的折射率视为1。严格说来,空气的折射率为1.0003或1.00029。光在其他液态和固态介质中的传播速度总是小于真空中的传播速度,因此,它们的折射率总是大于1。

介质的折射率大小取决于光波在该介质中的传播速度。光波的传播速度又取决于光与介质的相互作用。一定特征(波长、振动方向等)的某种光波在介质中的传播速度最终取决于该介质的组成成分及其微观结构(离子排列、键性及堆积的紧密程度)。因此,折射率值是反映介质(尤其是晶体)的成分及微观结构的重要常数。实践证明,折射率值是鉴定透明矿物较可靠的光学常数之一。

1.2.2 光的全反射及全反射临界角

由折射定律可知,当光由折射率较小的介质(光疏介质)射入折射率较大的介质(光密介质)时,其 $V_r<V_i$,相对折射率大于1,即 $\sin i/\sin r>1$,$i>r$,其折射线更靠近法线。反之,当光由折射率较大的介质射入折射率较小的介质时,其 $V_r>V_i$,相对折射率小于1,即 $\sin i/\sin r<1$,$i<r$,其折射线更远离法线。

设一玻璃块的折射率大于空气(图4.1.3),玻璃块底部的光波 O 向各方向发出 OA、OB、OC、OD、OE 等一系列光线。其中 OA 垂直界面,$i=0°$,故 $r=0°$,不发生折射,光线 AA' 沿 OA 的原方向射入空气。OB 光线入射角 $i=10°$,在界面上的 B 点折射形成折射线 BB'(为清楚起见未表示反射线),其折线角大于入射角($r>i$),BB' 比 OB 更远离法线。随着入射角的逐渐增大,折射角必将不断增大,折射线愈来愈远离法线。至 OD 光线时,$i=30°$,算得其 $r=90°$,表示相应的折射线 DD' 将沿界面进行。此后,如果光线的入射角继续增大,如图4.1.3中的 OE 光线,$i=40°$,其折射角 r 大于90°,表示"折射线"已经不在折射介质中,而这是不可能的。这一矛盾的结果意味着折射线已不复存在,折射现象亦不复存在。入射光的能量将只能全部变为反射光的能量,即入射光的全部能量将以反射光形式按反射定律(入射角=反射角)全部返回入射介质中(如图4.1.3的 EE' 光线)。此时观察到的反射线强度随着折射线的消失而出现一突变性的飞跃增强。这一现象称全反射。与 $r=90°$ 相应的入射角称全反射临界角(如图4.1.3中玻璃块的全反射临界角为30°)。设图4.1.3中玻璃块上方介质的折射率值为 n,玻璃块的折射率为 $N(N>n)$,以 ϕ 角代表全反射临界角,则得下式:

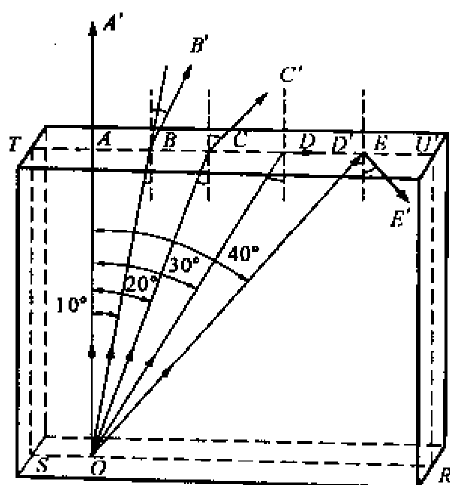


图4.1.3 全反射及临界角示意图

$$\sin\phi/\sin 90°=n/N$$

$$n=N\cdot\sin\phi$$

由上式可知,如果大折射率介质的 N 值为已知值时,则可根据全反射临界角计算出小折射率介质的 n 值。测定折射率值的阿贝折射仪就是利用全反射原理设计制成的(油浸法一章

中介绍)。如果已知两个介质的 N 和 n,即可计算其全反射临界角。

1.3 自然光和偏振光

根据光波的振动特点,可分为自然光及偏振光。从光源直接发出的光,一般都是自然光,如太阳光、灯光等。自然光是由无数方向横振动合成的复杂混合波。其振动特点是:在垂直光波传播方向的平面内,各个方向上都有等振幅的光振动(图 4.1.4(a))。

只在垂直传播方向的某一固定方向上振动的光波,称平面偏振光,简称偏振光或偏光(图 4.1.4(b))。偏光振动方向与传播方向所构成的平面称振动面。

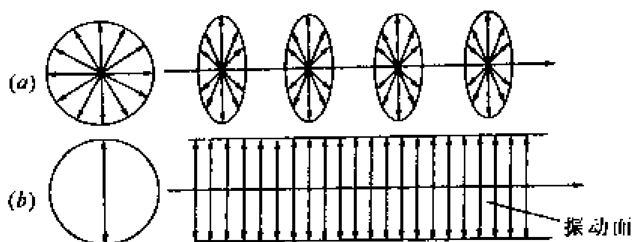


图 4.1.4 自然光和偏振光振动特点示意图
(a)自然光;(b)偏振光

自然光经过反射、折射、双折射及选择吸收作用可以转变为偏光,使自然光转变为偏光的作用称为偏光化作用。晶体光学研究中主要是应用偏光。研究的主要工具是偏光显微镜,其中装有使自然光转变为偏光的偏光镜。偏光镜通常是利用双折射作用(尼科尔棱镜等)或选择吸收作用(偏光片)产生偏光的原理制成的。自然光通过偏光镜(起偏镜)后即转变成振动方向固定的偏光。

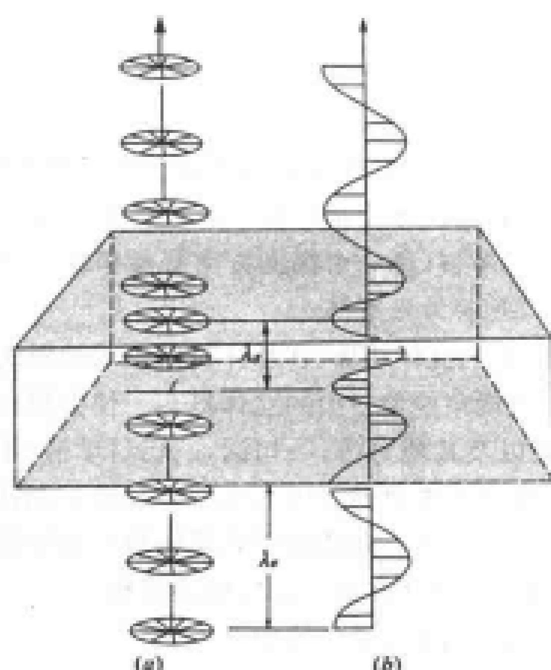
1.4 光波在均质体和非均质体中的传播特点

根据透明物质的光学性质,可划分为均质体和非均质体两大类。等轴晶系矿物和非晶质物质的光学性质各方向相同,称为光性均质体,简称均质体,如石榴石、萤石、火山玻璃、加拿大树胶等都是均质体。中级晶族和低级晶族矿物的对称程度低于等轴晶系矿物,其光学性质随方向而异,称为光性非均质体,简称非均质体,如石英、长石、橄榄石等。绝大多数造岩矿物属于非均质体,是我们研究的重点。

光性均质体(各向同性介质):特定频率的光波在均质体中传播时,其传播速度不因光波在晶体中的振动方向不同而发生改变。也就是说,均质体的折射率值不因光波在晶体中的振动方向不同而发生改变,其折射率值只有一个。光波射入均质体中发生单折射现象(如第二节所述),基本不改变入射光波的振动特点和振动方向(图 4.1.5)。也就是说,自然光射入均质体后,基本上仍为自然光;偏光射入均质体后仍为偏光,而且其振动方向基本不改变。

光性非均质体(各向异性介质):特定频率的光波在非均质体中传播时,其传播速度随光波在晶体中的振动方向不同而发生改变。因此,非均质体的折射率值亦随光波在晶体中的振动方向不同而发生变化,即非均质体的折射率值有许多个。光波射入非均质体,除特殊方向外,都要发生双折射,分解形成振动方向不同、传播速度不同、折射率值不等的两种偏光(如图 4.1.6 中的 P_o 与 P_e)。两种偏光的折射率值之差称为双折射率。当入射光波为自然光时,非均质体能改变入射光波的振动特点。当入射光波为偏光时,也可以改变入射光波的振动方向。

是不是光波沿任何方向射入都要发生双折射呢?实验证明,光波沿非均质体的特殊方向射入时(如沿中级晶族晶体的 Z 轴方向),不发生双折射,基本不改变入射光波的振动特点和



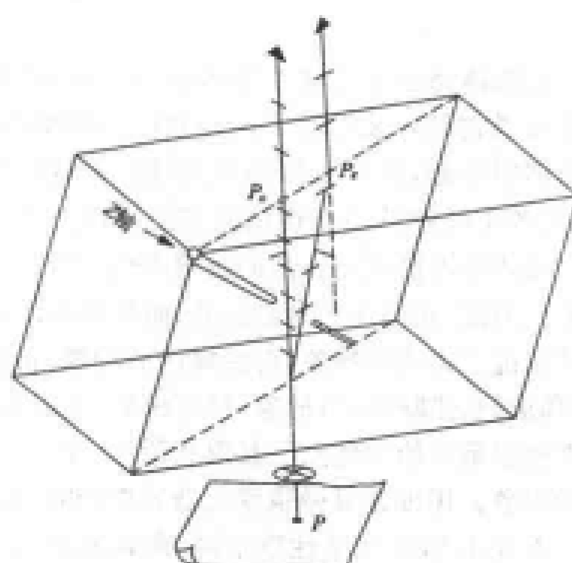


图 4.1.5　光波垂直均质体薄片入射示意图
(a)自然光；(b)偏振光
(据 F. D. Bloss，1961，修改)

图 4.1.6　冰洲石的双折射现象
(据 F. D. Bloss，1961，修改)

振动方向。非均质体中，这种不发生双折射的特殊方向称为光轴。中级晶族晶体只有一个光轴方向，称为一轴晶；低级晶族晶体有两个光轴方向，称为二轴晶。

特定频率的光波射入一轴晶矿物，发生双折射分解成两种偏光(图 4.1.6)。一种偏光的振动方向永远垂直 Z 晶轴，其传播速度及折射率值不变，称为常光，以符号“o”表示(图 4.1.6 中的 P_o)。另一种偏光的振动方向平行于 Z 晶轴与光波传播方向(波法线)所构成的平面，其传播速度及折射率值随振动方向不同而改变，称为非常光，以符号“e”表示(图 4.1.6 中的 P_e)。

光波在非均质体中的传播速度为什么与光波在晶体中的振动方向有关呢？根据电磁波理论，组成物质的原子或离子受电磁波扰动将极化成偶极子，可见光在物质中的传播主要是通过偶极子的感应振动进行的。在晶体中，使振动偶极子回复到平衡位置的回复力强度控制光波的传播速度。也就是说光波在晶体中的传播速度随振动偶极子回复力的增强而加大，偶极子的振动及其回复力是横切光波传播方向的。因此，光在晶体中的传播速度取决于光波的振动方向而不决定于传播方向。同理，晶体的折射率值取决于光波的振动方向，即非均质体的折射率值随光波在晶体中的振动方向不同而改变。

晶体中感应振动偶极子的回复力强度取决于组成晶体的离子种类、键性、离子排列形式及堆积的紧密程度。

实验证明，透明矿物薄片在偏光显微镜下所显示的一些光学性质，大都与光波在晶体中的振动方向及相应折射率值有密切联系。为了反映光波在晶体中传播时，光波振动方向与相应折射率值之间的关系，我们使用物理学中所建立的光率体概念。在探讨透明矿物薄片的光学性质之前，必须了解各类晶体的光率体特征及其主要方向切面的特征。

1.5 光 率 体

光率体是表示光波在晶体中传播时，折射率值随光波振动方向变化的一种立体几何图形，也可以说它是光波振动方向与相应折射率值之间关系的一种光性指示体。其具体作法是设想自晶体中心起，沿光波振动方向按比例截取相应的折射率值，每一个振动方向都能作出一个线段，把各个线段的端点连接起来便构成一个立体图形，此即为光率体。

晶体中不同振动方向的折射率值，可以利用不同方向的晶体切面，在晶体折射仪或油浸法中测出。因此，光率体不是臆造的，而是从晶体光学的具体现象抽象得出的立体概念。伟大导师列宁曾说过："物质的抽象，自然规律的抽象，价值的抽象以及其他等等，一句话，一切科学的（正确的、郑重的、非瞎说的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。"因而光率体反映了晶体光学性质中最本质的特点。其形状简单，应用方便。在以后各章中都将应用光率体解释各种晶体光学现象。用偏光显微镜鉴定造岩矿物时，也是以光率体在每种矿物中的方位为依据。

各类晶体的光学性质不同，所构成的光率体形状也不相同，兹分述如下：

1.5.1 均质体的光率体

光波在均质体中传播时，向任何方向振动，其传播速度不变，折射率值相等。因此，均质体的光率体是一个圆球体（图 4.1.7）。均质体的光率体任何方向的切面都是圆切面，圆切面的半径代表均质体的折射率值（N）。

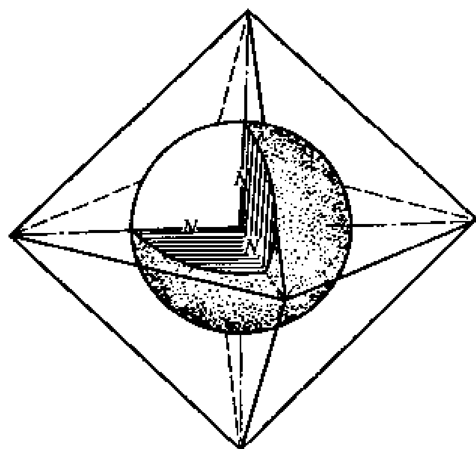


图 4.1.7 均质体的光率体

1.5.2 一轴晶光率体

中级晶族矿物晶体的水平结晶轴单位相等，其水平方向上的光学性质相同。根据测定，这类矿物有最大和最小两个主折射率值，分别以符号 N_e 和 N_o 表示。光波振动方向平行 Z 轴时，相应的折射率值为 N_e；光波振动方向垂直 Z 轴时，相应的折射率值为 N_o。光波振动方向斜交 Z 轴时，相应的折射率值大小递变于 N_e 与 N_o 之间，以符号 N_e' 表示。N_e' 值大小随光波振动方向与 Z 轴的夹角大小而变化。光波振动方向与 Z 轴夹角小时，N_e' 接近于 N_e；随着夹角的逐渐加大，N_e' 逐渐向 N_o 靠近，至等于 90°时即为 N_o。显然，一轴晶光率体是一个以 Z 晶轴为旋转轴的旋转椭球体，而且有正负之分。兹以石英和方解石为例，分别加以说明。

当光波平行石英 Z 轴方向射入晶体时（图 4.1.8(a)），不发生双折射，在晶体折射仪上测得垂直入射光的各个振动方向上的折射率值均为 1.544，即 $N_o=1.544$。以此数值为半径构成一个垂直入射光波（即垂直 Z 轴）的圆切面。

当光波垂直石英 Z 轴射入晶体时（图 4.1.8(b)），发生双折射，分解形成两种偏光。其一振动方向垂直 Z 轴（常光），测得其折射率值为 1.544，即 $N_o=1.544$。另一种偏光振动方向平行 Z 轴（非常光），测得其折射率值为 1.553，即 $N_e=1.553$。在 Z 轴方向上从中心向两边按一定比例截取 N_e 值，在垂直 Z 轴方向上按一定比例截取 N_o 值，以此两个线段为长、短半径，即

构成垂直入射光波且包含 Z 轴的椭圆切面。将这两个切面按其空间位置联系起来，便构成以 Z 轴为旋转轴的一个长形旋转椭球体(图 4.1.8(c))。此即石英的光率体，其旋转轴为光轴。

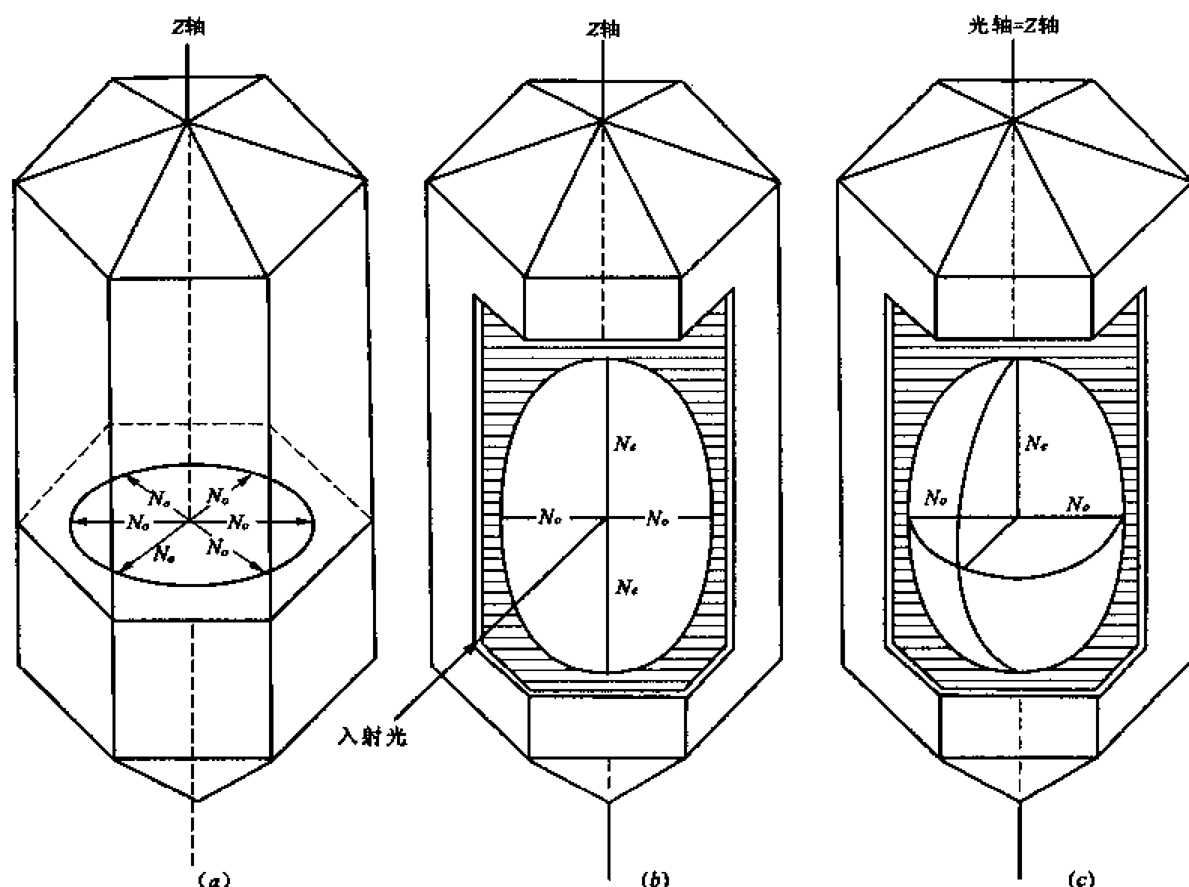


图 4.1.8　一轴晶光率体的构成

此种光率体的特征是其旋转轴为长轴(图 4.1.8(c)及图 4.1.9)，光波平行 Z 轴(光轴)振动时的折射率值总是大于垂直 Z 轴振动时的折射率，即 $N_e>N_o$。凡具这种特点的光率体称为一轴晶正光性光率体，相应的矿物称一轴晶正光性矿物。

当光波平行方解石 Z 轴射入晶体时，不发生双折射，测得垂直入射光的各个振动方向的折射率值均为 1.658，即 $N_o=1.658$。当光波垂直方解石 Z 轴射入晶体时，发生双折射，分解形成两种偏光。其一振动方向垂直 Z 轴(常光)，测得相应的折射率 $N_o=1.658$。另一种偏光振动方向平行 Z 轴(非常光)，测得相应的折射率 $N_e=1.486$。按上述石英光率体的作法，构成以 Z 轴为旋转轴的一个扁形旋转椭球体(图 4.1.9)，即方解石的光率体。它与石英光率体的区别在于其旋转轴为短轴，光波平行 Z 轴振动时的折射率总是小于垂直 Z 轴振动时的折射率，即 $N_e<N_o$。凡具这种特征的光率体称为一轴晶负光性光率体，相应的矿物称一轴晶负光性矿物。

由上可知，一轴晶光率体是旋转椭球体，无论是正光性或负光性，其旋转轴(直立轴)都是 N_e 轴，其水平轴为 N_o 轴(图 4.1.9)。N_e 与 N_o 代表一轴晶矿物折射率的最大与最小值，称主折射率。主折射率 N_e 与 N_o 的相对大小决定一轴晶矿物的光性正负。当 $N_e>N_o$ 时，其光性为正(图 4.1.9)；当 $N_e<N_o$ 时，其光性为负(图 4.1.9)。N_e 与 N_o 的差值为一轴晶矿物的最大双折射率。

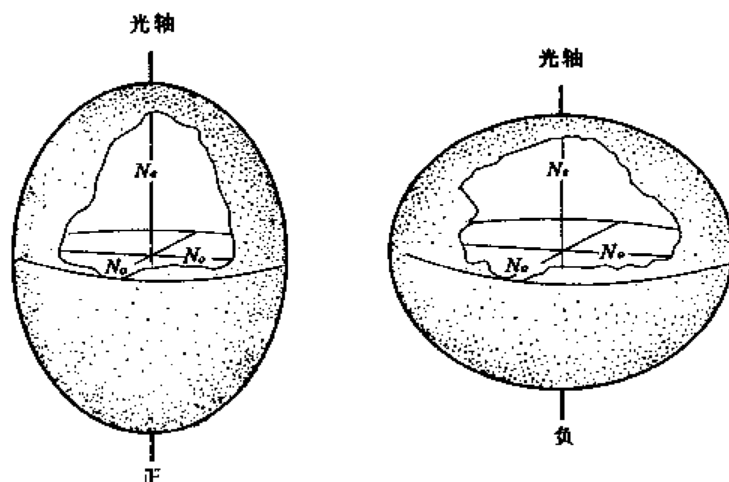


图 4.1.9 一轴晶光率体

(据 E. E. Wahlstrom, 1979)

在偏光显微镜下鉴定透明矿物时，所遇到的都是矿物晶体不同方向的切面(即不同方向的光率体切面)。一轴晶光率体的主要切面有下列三种：

(1)垂直光轴的切面(图 4.1.10(a))

为圆切面，其半径等于 N_o。光波垂直这种切面入射时(即沿光轴入射)，不发生双折射，也不改变入射光波的振动方向，相应的折射率等于 N_o，双折射率等于零。一轴晶光率体只有一个这样的圆切面。

(2)平行光轴的切面(图 4.1.10(b))

为椭圆切面，其长短半径分别为 N_o 和 N_e(正光性：长半径为 N_e，短半径为 N_o；负光性：长半径为 N_o，短半径为 N_e)。光波垂直这种切面入射时(即垂直光轴入射)，发生双折射分解形成两种偏光。其振动方向必定分别平行椭圆切面的长短半径，相应的折射率必定分别等于椭圆切面的长短半径 N_e 与 N_o。双折射率必等于椭圆切面长短半径 N_e 与 N_o 之差，是一轴晶矿物的最大双折射率。这种切面是一轴晶光率体的主切面。

(3)斜交光轴的切面(图 4.1.10(c))

仍为椭圆切面，其长短半径分别为 N_o 与 N_e'。光波垂直这种切面入射时(即斜交光轴入射)，发生双折射分解形成两种偏光。其振动方向必定分别平行椭圆切面的长短半径，相应的折射率必定分别等于椭圆切面长短半径 N_o 与 N_e'。双折射率等于椭圆切面长短半径 N_o 与 N_e' 之差，其大小递变于零与最大双折射率之间。在一轴晶光率体任何斜交光轴的椭圆切面长短半径中，始终有一个是 N_o。如为正光性，短半径为 N_o；如为负光性，长半径为 N_o。

应用光率体，可以确定光波在晶体中的传播方向(波法线方向)、振动方向及相应折射率之间的关系。光波沿光轴方向射入晶体，垂直入射光波的光率体切面为圆切面，不发生双折射，也不改变入射光波的振动方向，其双折射率等于零。光波沿其他任何方向射入晶体，垂直入射光波的光率体切面均为椭圆切面，其长短半径分别代表入射光波发生双折射分解形成的两种偏光的振动方向，半径长短分别代表两种偏光的折射率值，长短半径之差代表其双折射率值。在一轴晶矿物中，垂直光轴切面的双折射率为零，平行光轴切面的双折射率最大，其他方向切面的双折射率值递变于零与最大双折射率之间。

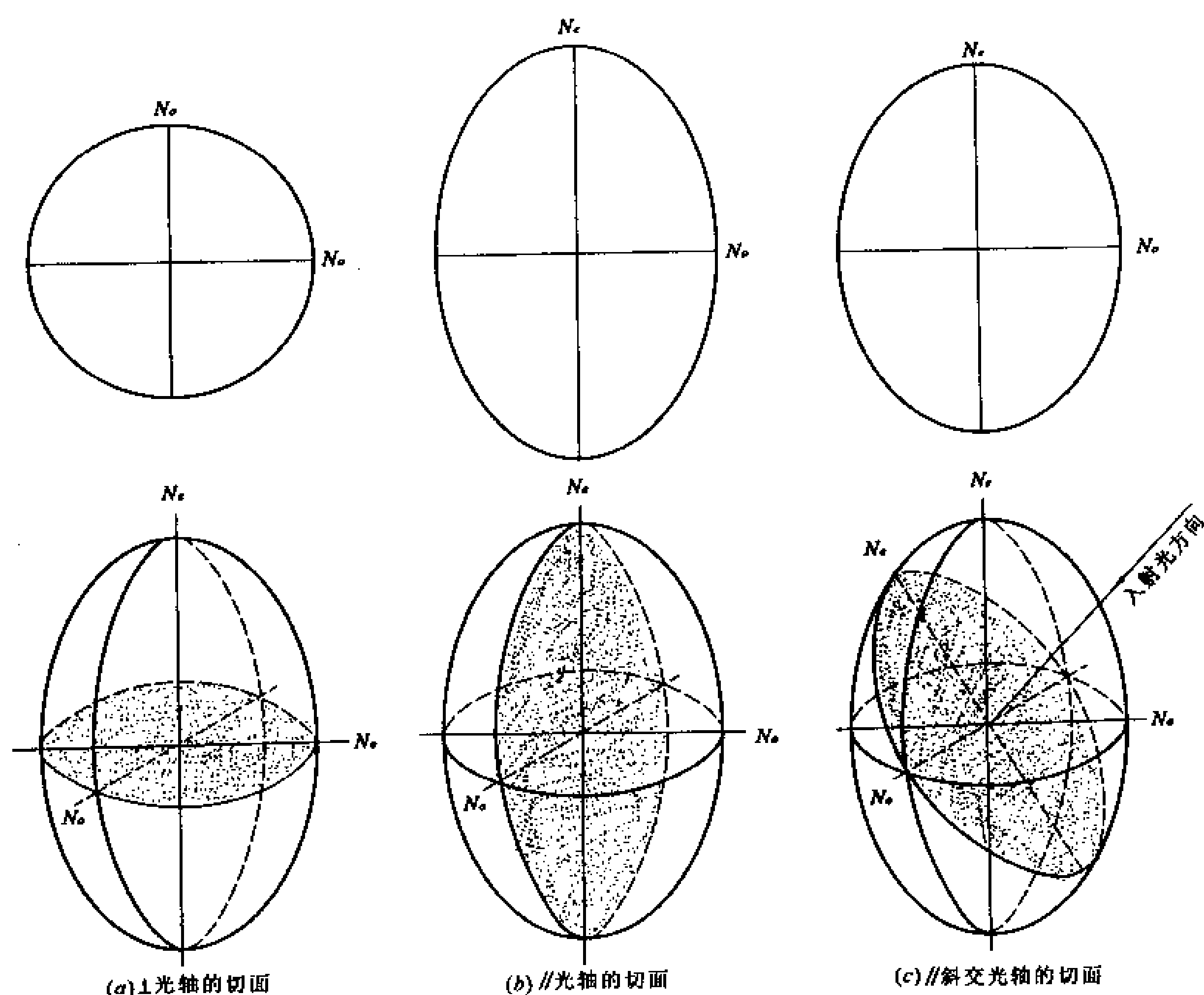


图 4.1.10　一轴晶正光性光率体的主要切面

1.5.3　二轴晶光率体

低级晶族(斜方、单斜、三斜晶系)属于二轴晶矿物。这类矿物晶体的3个结晶轴单位不相等($a \neq b \neq c$),表明它们三度空间方向的不均一性。实验证明,这类矿物都具有大、中、小3个主折射率值,它们分别与互相垂直的3个振动方向相当,通常以符号 N_g、N_m、N_p 代表大、中、小3个主折射率值。当光波沿其他方向振动时,相应的折射率值递变于 N_g、N_m、N_p 之间,一般以符号 N_g' 和 N_p' 表示,它们与 N_g、N_m、N_p 的相对大小关系是:$N_g > N_g' > N_m > N_p' > N_p$。显然,二轴晶光率体是一个三轴不等的椭球体(图 4.1.11(d))。兹以斜方晶系矿物镁橄榄石为例说明二轴晶光率体的构成。

当光波沿镁橄榄石 Z 晶轴方向射入晶体时,发生双折射分解形成两种偏光。其一振动方向平行 X 晶轴,测得其折射率值等于 1.715;另一种偏光振动方向平行 Y 晶轴,测得其折射率值等于 1.651。在 X 晶轴方向上,由中心向两边按比例截取折射率值 1.715;在 Y 晶轴方向上按比例截取折射率值 1.651。以此二线段为长短半径构成垂直入射光波(即垂直 Z 晶轴)的椭圆切面(图 4.1.11(a))。

当光波沿镁橄榄石 X 晶轴方向射入晶体时,发生双折射分解成两种偏光。其一振动方向平行 Y 晶轴,测得其折射率等于 1.651;另一种偏光振动方向平行 Z 晶轴,相应的折射率值等

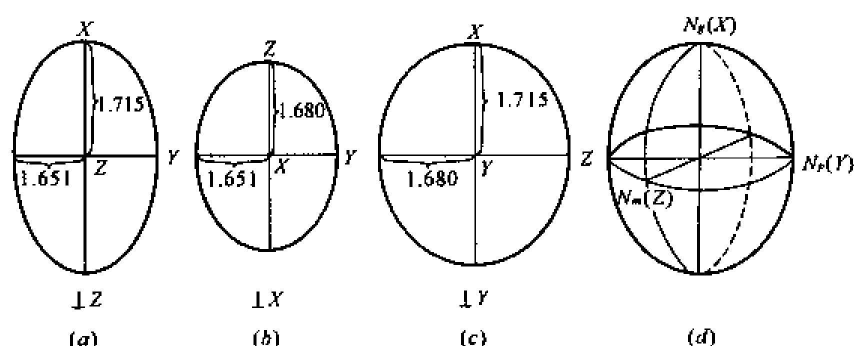


图 4.1.11 二轴晶光率体的构成

于 1.680。以同样的方法构成垂直入射光波(垂直 X 晶轴)的椭圆切面(图 4.1.11(b))。

当光波沿镁橄榄石 Y 晶轴方向射入晶体时,发生双折射分解形成两种偏光。其一振动方向平行 X 晶轴,相应的折射率值等于 1.715;另一种偏光振动方向平行 Z 晶轴,相应的折射率值等于 1.680。按同样的方法构成垂直入射光波(垂直 Y 晶轴)的椭圆切面(图 4.1.11(c))。

把这 3 个椭圆切面,按照它们的空间位置联系起来,便构成了镁橄榄石的光率体。它是一个三轴不等的椭球体(图 4.1.11(d)),即三轴椭球体。

从镁橄榄石 3 个主要方向切面上测定的实际情况可以看出,它有大(1.715)、中(1.680)、小(1.651)3 个主折射率值。它们的振动方向分别平行 X、Z、Y 结晶轴。实验证明,其他二轴晶矿物都有大、中、小(N_g、N_m、N_p)3 个主折射率值,分别与互相垂直的 3 个振动方向相当。但其 N_g、N_m、N_p 的大小及与它们相当的互相垂直的 3 个振动方向在晶体中的位置与镁橄榄石不相同。

二轴晶光率体(三轴椭球体)中,3 个互相垂直的轴代表二轴晶矿物的 3 个主要光学方向,称光学主轴,简称主轴,即 N_g 轴、N_m 轴和 N_p 轴。包括两个主轴的切面,称主轴面(主切面)。二轴晶光率体有 3 个互相垂直的主轴面,即 N_gN_p 面、N_gN_m 面与 N_mN_p 面。

因为二轴晶光率体是一个三轴不等的椭球体,通过 N_m 轴在光率体的一侧(N_g 轴与 N_p 轴之间),可以连续作一系列椭圆切面(图 4.1.12(a))。这些切面的半径之一始终是 N_m 轴,另一半径递变于 N_g 与 N_p 之间。因系连续变化,在它们中间总可找到一个半径相当于 N_m 的圆切面。在光率体的另一侧,同样可截出另一圆切面(图 4.1.12(b))。光波垂直这两个圆切面入射时,不发生双折射,因而这两个方向是光轴方向,以符号"OA"表示(图 4.1.12(b)及图 4.1.13)。通过光率体中心,只能截出两个圆切面,即只有两个光轴,故称二轴晶。

包括两个光轴的面称光轴面(与主轴面 N_gN_p 面一致),以符号"A_p"表示。通过光率体中心而垂直光轴面的方向称光学法线(与主轴 N_m 轴一致)。两个光轴之间所夹的锐角称光轴角,以符号"$2V$"表示。两个光轴之间锐角的平分线称锐角等分线,以符号"Bxa"表示;两个光轴之间钝角的平分线称钝角等分线,以符号"Bxo"表示。

根据 N_g、N_m、N_p 的相对大小确定二轴晶矿物的光性符号。当 $N_g-N_m>N_m-N_p$ 时,为正光性。在这种情况下,N_m 值比较接近 N_p 值,以 N_m 为半径的两个圆切面必然比较靠近 N_p 轴(图 4.1.13(a)),垂直圆切面的两个光轴必更靠近 N_g 轴。因此,两个光轴之间的锐角等分线(Bxa)必定是 N_g 轴。当 $N_g-N_m<N_m-N_p$ 时,为负光性。其 N_m 值比较接近 N_g 值,以 N_m 为半径的两个圆切面必更靠近 N_g 轴(图 4.1.13(b)),垂直圆切面的两个光轴必更靠近 N_p 轴。因此,两个光轴之间的锐角等分线必为 N_p 轴。由此可见,二轴晶的光性符号也可根据

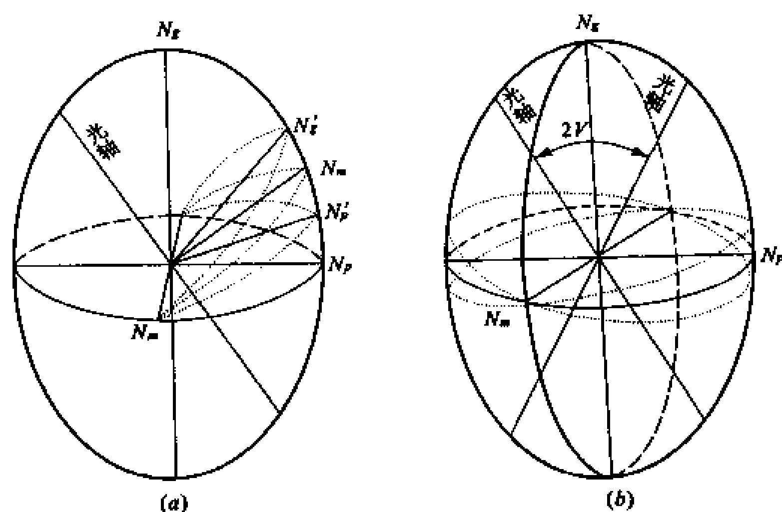


图 4.1.12　二轴晶光率体的圆切面及光轴

Bxa 究竟是 N_g 轴还是 N_p 轴来确定。当 $Bxa=N_g$ 时，为正光性；$Bxa=N_p$ 轴时，为负光性。

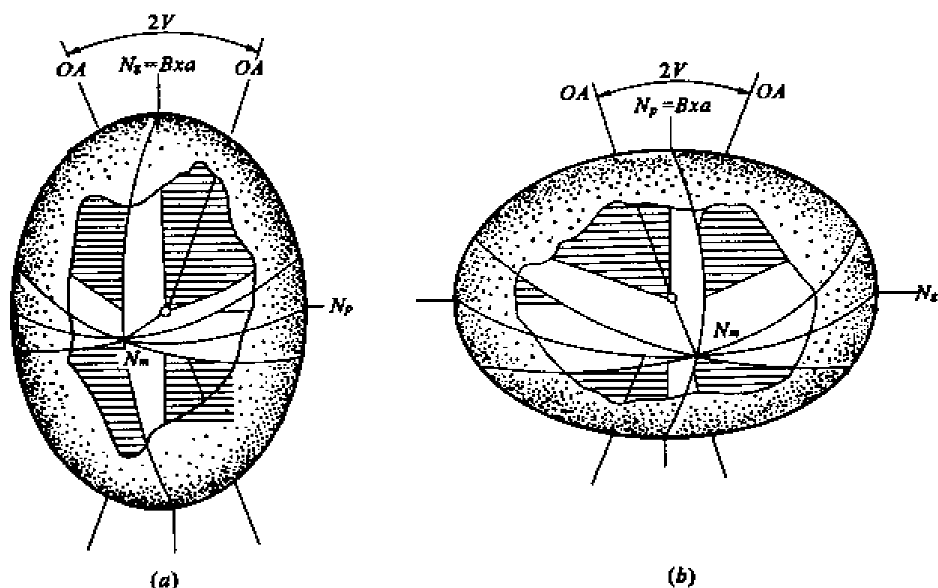


图 4.1.13　二轴晶正、负光率体

2V 的大小可按下面简化式求得：

$$\tan V = \sqrt{\frac{N_m - N_p}{N_g - N_m}} \qquad (+)$$

$$\tan V = \sqrt{\frac{N_g - N_m}{N_m - N_p}} \qquad (-)$$

二轴晶光率体的主要切面：

(1)垂直光轴的切面(图 4.1.14(a))

为圆切面，其半径等于 N_m。光波垂直这种切面入射时(即沿光轴入射)，不发生双折射，也不改变入射光波的振动方向。其折射率等于 N_m，双折射率等于零。

(2)平行光轴面的切面(图 4.1.14(b))

椭圆切面(相当于主轴面 N_gN_p 面)，其长短半径分别等于 N_g 与 N_p。光波垂直这种切面

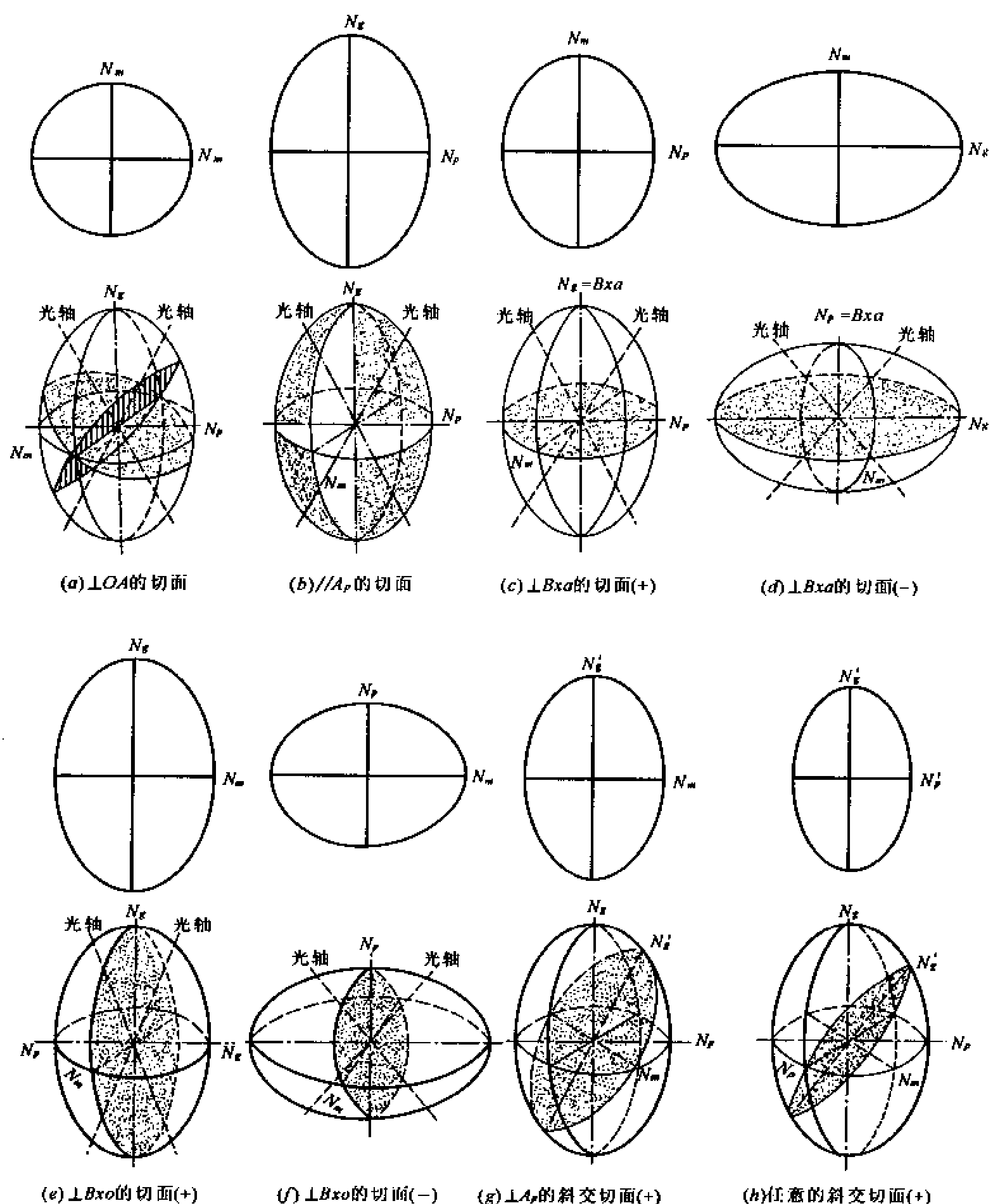


图 4.1.14 二轴晶光率体的主要切面

入射(即沿 N_m 入射)时,发生双折射,分解形成两种偏光。其振动方向分别平行 N_g 轴与 N_p 轴;折射率分别等于主折射率 N_g 与 N_p。双折射率等于 $N_g - N_p$,是二轴晶矿物的最大双折射率。

(3)垂直 Bxa 的切面(图 4.1.15(c)、(d))

椭圆切面,正光性晶体相当于主轴面 N_mN_p 面;负光性晶体相当于主轴面 N_gN_m 面。光波垂直这种切面入射时(即沿 Bxa 方向入射),发生双折射,分解形成两种偏光。其振动方向分别平行 N_m 轴与 N_p 轴或 N_m 与 N_g 轴;折射率分别等于 N_m 与 N_p 或 N_m 与 N_g 轴。双折射

率等于 N_m-N_p 或 N_g-N_m，其大小介于零与最大值之间。

(4)垂直 Bxo 的切面(图 4.1.14(e)、(f))

椭圆切面，正光性晶体相当于主轴面 N_gN_m 面，负光性晶体相当于主轴面 N_mN_p 面。光波垂直这种切面入射(即沿 Bxo 方向入射)时，发生双折射，分解形成两种偏光。其振动方向分别平行 N_m 与 N_g 轴或 N_m 与 N_p 轴；折射率分别等于 N_g 与 N_m 或 N_p 与 N_m。双折射率等于 N_g-N_m 或 N_m-N_p，其大小介于零与最大值之间。但无论光性是正或是负，垂直 Bxa 切面的双折射率总是小于垂直 Bxo 切面的双折射率。

因为正光性晶体 N_g、N_m、N_p 的相对大小是：

$$\underset{\text{等于}\perp Bxo\text{切面的双折射率}}{\underbrace{N_g-N_m}} > \underset{\text{等于}\perp Bxa\text{切面的双折射率}}{\underbrace{N_m-N_p}}$$

负光性晶体 N_g、N_m、N_p 的相对大小是：

$$\underset{\text{等于}\perp Bxa\text{切面的双折射率}}{\underbrace{N_g-N_m}} < \underset{\text{等于}\perp Bxo\text{切面的双折射率}}{\underbrace{N_m-N_p}}$$

以上平行光轴面、垂直 Bxa 及垂直 Bxo 的切面都相当于二轴晶光率体的主轴面，即属于垂直主轴的切面。

(5)斜交切面

既不垂直主轴，也不垂直光轴的切面属于斜交切面。这种切面有无数个，它们都是椭圆切面(非主轴面)。斜交切面大体上可分为两种类型：①垂直主轴面(即垂直 N_gN_p 面、N_gN_m 面及 N_mN_p 面)的斜交切面，称半任意切面。这种切面的椭圆长短半径中，总有一个半径是主轴(N_g 或 N_m 或 N_p)，另一个半径是 N_g' 或 N_p'。垂直光轴的圆切面，实质上是这类切面中的特殊类型。在半任意切面中比较重要的是垂直 N_gN_p 面(即光轴面)的斜交切面(图 4.1.14(g))。这种切面的椭圆长短半径中总有一个是 N_m，另一个半径是 N_g' 或 N_p'。在某些情况下，它可以代替垂直光轴的切面。②任意斜交切面(图 4.1.14(h))。椭圆的长短半径分别为 N_g' 和 N_p'。光波垂直这类斜交切面入射(即除光轴和主轴以外的任意方向)时，发生双折射，分解形成两种偏光。其振动方向分别平行椭圆长短半径方向；折射率值分别等于长短半径。双折射率等于长短半径之差，其大小变化介于零与最大值之间。

1.6 光性方位

光率体的主轴与晶体结晶轴之间的关系称光性方位。光性方位因晶体所属的晶系不同而不同。

1.6.1 中级晶族晶体的光性方位

一轴晶光率体是一个旋转椭球体，其旋转轴(光轴)与晶体的高次对称轴一致。正光性晶体如石英(图 4.1.15(a))；负光性晶体如方解石(图 4.1.15(b))。

1.6.2 低级晶族晶体的光性方位

二轴晶光率体为三轴椭球体，具 3 个互相垂直的二次对称轴(主轴)、3 个对称面(主轴面)

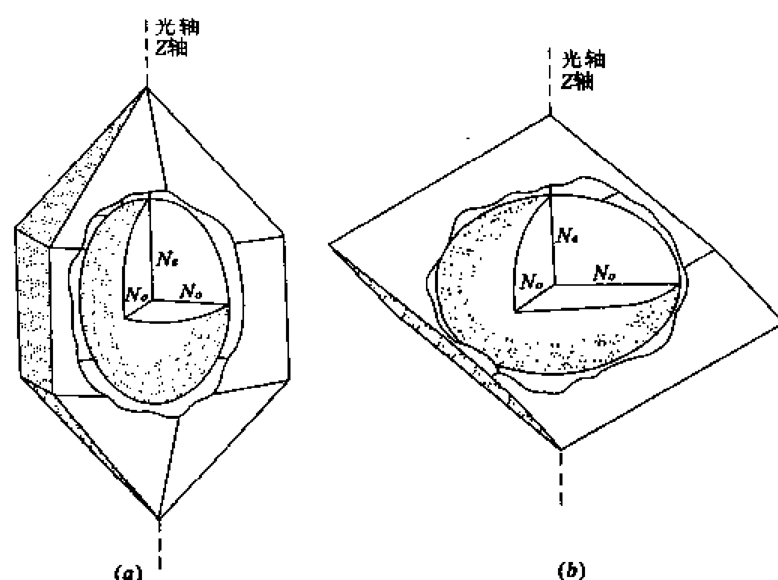


图 4.1.15　中级晶族晶体的光性方位

和 1 个对称中心。其对称要素相当于斜方晶系的对称要素($3L^2 3PC$)。因此，斜方晶系的光性方位是：光率体的 3 个主轴与晶体的 3 个结晶轴一致。究竟是哪一个主轴与哪一个结晶轴一致，因矿物不同而不同，如黄玉是 $N_p=X$，$N_m=Y$，$N_g=Z$(图 4.1.16(a))。

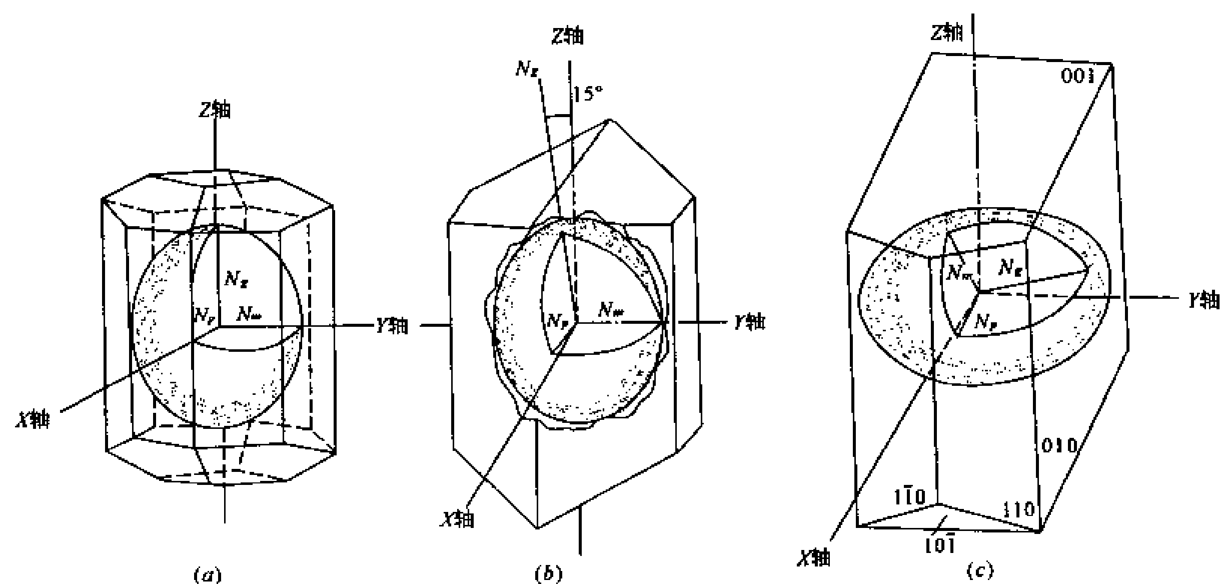


图 4.1.16　低级晶族晶体的光性方位

(a)黄玉；(b)透闪石；(c)斜长石(An_{35})

单斜晶系晶体的对称要素是 L^2PC。Y 晶轴为二次对称轴，Y 轴与光率体三个主轴之一重合，其余两个主轴与结晶轴斜交。究竟是哪一个主轴与 Y 轴一致，其余二主轴与结晶轴斜交角度有多大，视矿物种类而不同。如透闪石是 $N_m=Y$ 轴，$N_g \wedge Z=15°$(图 4.1.16(b))。

三斜晶系的对称程度最低，只有一个对称中心与光率体的对称中心相当。因而三斜晶系晶体的光性方位是光率体的 3 个主轴与晶体的 3 个晶轴均斜交，其斜交角度因矿物不同而不同。图 4.1.16(c)表示斜长石(An_{35})光性方位。

1.7 色　散

白光是由七种单色光组成。不同色光在同一介质中所表现出的光学性质差异称色散。介质的折射率值大小随单色光波波长不同而发生改变的现象称折射率色散。把这种现象作成曲线称折射率色散曲线(图 4.1.17)。一般说来,介质的折射率随入射光波波长增大而减小。液体介质的折射率色散通常比固体介质显著。在非均质体中,双折射率随单色光波长不同而发生改变的现象称双折射率色散。

光率体是以光波在晶体中的振动方向及相应折射率值之关系作成的。因此,同一介质不同波长单色光的光率体大小、形状及在晶体中的位置都可能发生改变。同一介质的光率体随单色光波波长不同而发生的几何形态改变称光率体色散。不同晶系晶体的光率体色散不同。

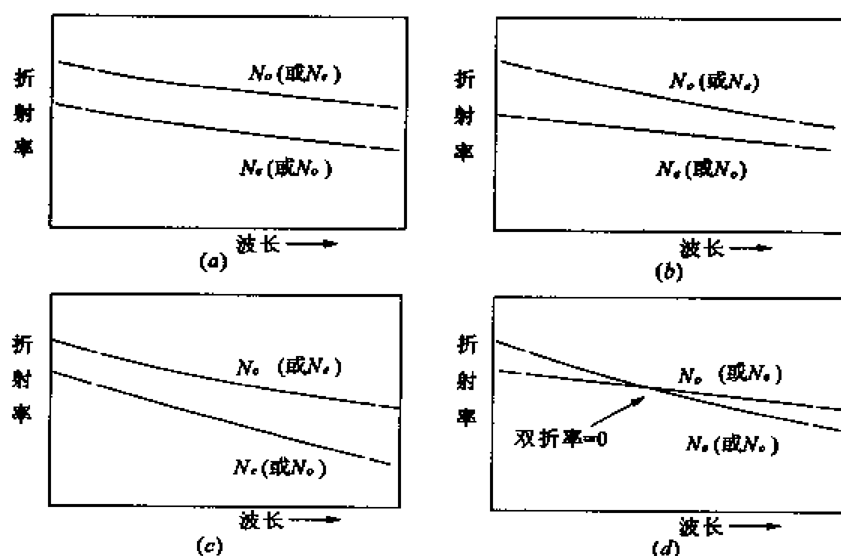


图 4.1.17　一轴晶的折射率色散曲线

(据 E. E. Wahlstrom, 1979)

1.7.1　均质体的光率体色散

各单色光光率体均为圆球体,仅半径大小不同,其形状及在晶体中的位置不变。折射率色散强弱因矿物而异,通常以紫光与红光折射率差值表示。如萤石色散弱,$N_v=1.437$,$N_r=1.431$,差值为 0.006;金刚石色散强,$N_v=2.465$,$N_r=2.402$,差值为 0.063。

1.7.2　一轴晶的光率体色散

各单色光光率体均是以光轴(Z 晶轴)为旋转轴的旋转椭球体,它们在晶体中的位置不变。但各种单色光的 N_e、N_o 随光波波长而变化(图 4.1.17)。如果 N_e、N_o 值随波长改变的变化幅度近于相同,则 N_e、N_o 色散曲线基本平行(图 4.1.17(a)),其双折射率无明显改变。各单色光的光率体大小不同,但其形状基本不变。如果 N_e、N_o 值随波长改变的变化幅度不同,当 N_e、N_o 色散曲线间距向波长增大方向变小时(图 4.1.17(b)),其双折射率随入射光波长增大而减小。当 N_e、N_o 色散曲线间距向波长增大方向加大时(图 4.1.17(c)),其双折射率随入射光波长增大而增大。在这两种情况中,各单色光的光率体不仅大小不同,而且旋转椭球体的长短轴之比发生改变。当 N_e、N_o 色散曲线相交时(图 4.1.17(d)),在特定波长时该介质为均质

体，双折射率大小由零点向两侧增大，在零点两侧的光性符号不同。各单色光光率体的大小和形状都有改变。例如表 4.1.1 所列铜铀云母即具有这样的色散特征。

表 4.1.1　铜铀云母的色散特征

所用单色光波	N_e	N_o	双折射率	光性符号
紫光	1.647	1.651	0.004	负光性
绿光	1.634	1.634	0	均质体
红光	1.622	1.618	0.004	正光性

1.7.3　二轴晶的光率体色散

二轴晶光率体色散较为复杂。三个主折射率 N_g、N_m、N_p 均随入射光波长改变而发生变化(图 4.1.18)。双折射率也随入射光的波长变化而改变，当 N_g、N_m、N_p 色散曲线近于平行时(图 4.1.18(*a*)、(*b*))，其双折射率无明显变化，光率体形状基本不变，2*V* 大小无明显变化，仅光率体大小改变。当 N_g、N_m、N_p 色散曲线间距向波长增大方向加大时(图 4.1.18(*c*))，双折射率随入射光波长加大而增大。当 N_g、N_m、N_p 色散曲线间距向波长增大方向减小时(图 4.1.18(*d*))，其双折射率随入射光波长的增大而减小。在这两种情况中，光率体的形状与大小均发生改变。由于形状的改变，引起光轴位置及光轴角大小的改变。至于光率体在晶体中的方位是否改变，因晶系不同而不同(在以后的锥光镜下色散现象的观察部分中介绍)。当 N_g、N_m、N_p 色散曲线中有两条色散曲线在特定单色光处相交时(图 4.1.18(*e*)、(*f*))，对特定

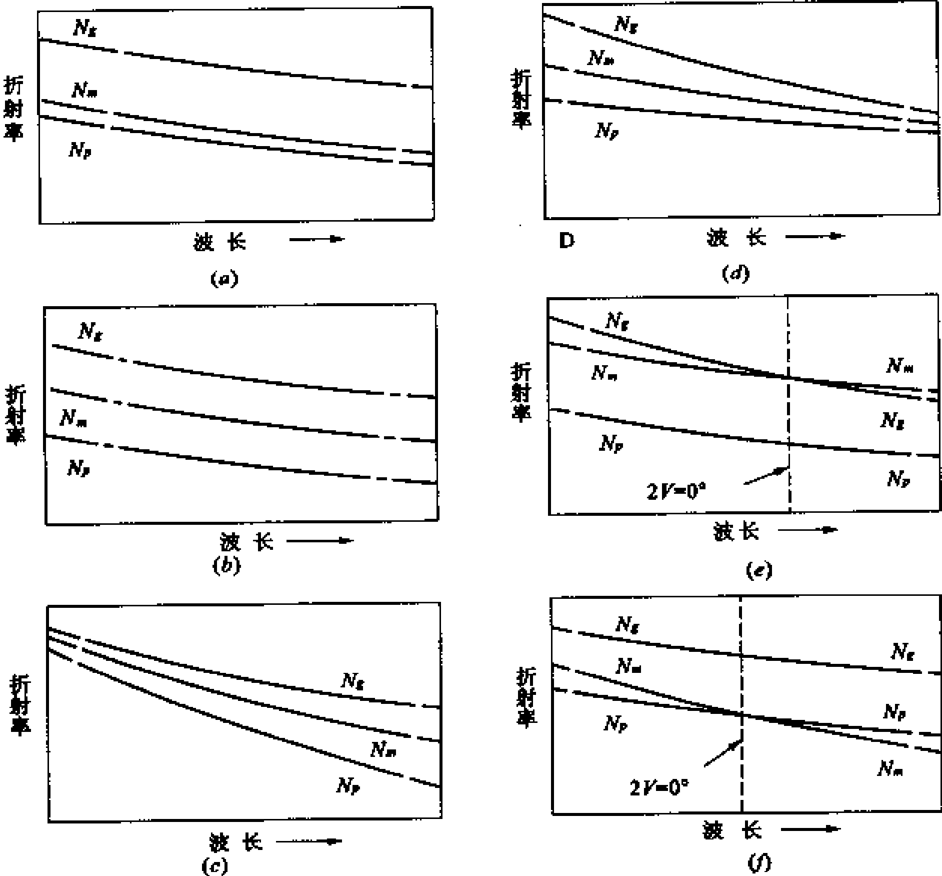


图 4.1.18　二轴晶折射率色散曲线
(据 E. E. Wahlstrom, 1979, 修改)

单色光来说此时为一轴晶,光率体形状和大小将发生改变。随着入射光波长的增大而光轴角变小,至交点处,光轴角为零(即一轴晶);在交点之后,随入射光波长增大而光轴角又变大,但其光轴面已改变位置;短波长的光轴面与长波长的光轴面互相垂直。这种光率体色散现象称正交光轴面色散。板钛矿即为显示正交光轴面色散的斜方晶系矿物。图 4.1.19 为板钛矿的折射率色散曲线。图 4.1.20 为板钛矿的紫光和红光光轴面方位,其紫光光轴面平行包含 Y 晶轴和 Z 晶轴的平面。随着入射光波长的增大 $2V$ 变小,在 555μm 附近 $2V=0°$(一轴晶)。波长大于 555μm,又出现 $2V$,但光轴面已改变成平行于包含 X 晶轴和 Y 晶轴的平面。紫光光轴面与红光光轴面互相垂直。

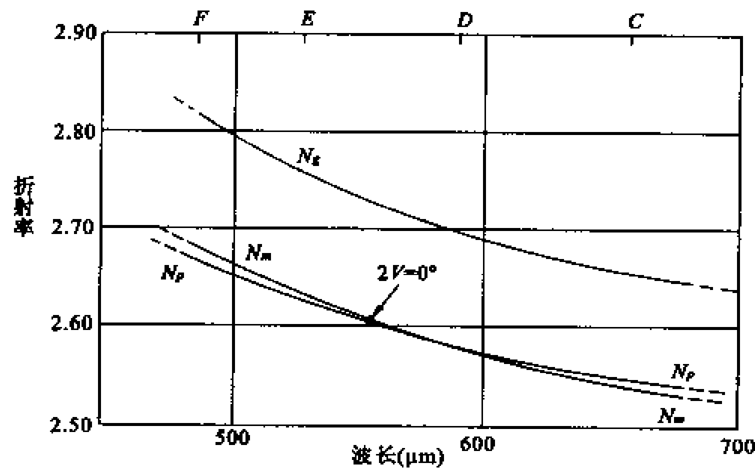


图 4.1.19 板钛矿的折射率色散曲线

(据 E. E. Wahlstrom,1979)

大多数矿物的色散弱,光率体发生的上述变化很小,在一般显微镜鉴定中表现不出来,可以忽略不计。但有些矿物的色散较强,能引起某些光学性质的改变,在以后的有关部分将分别介绍。

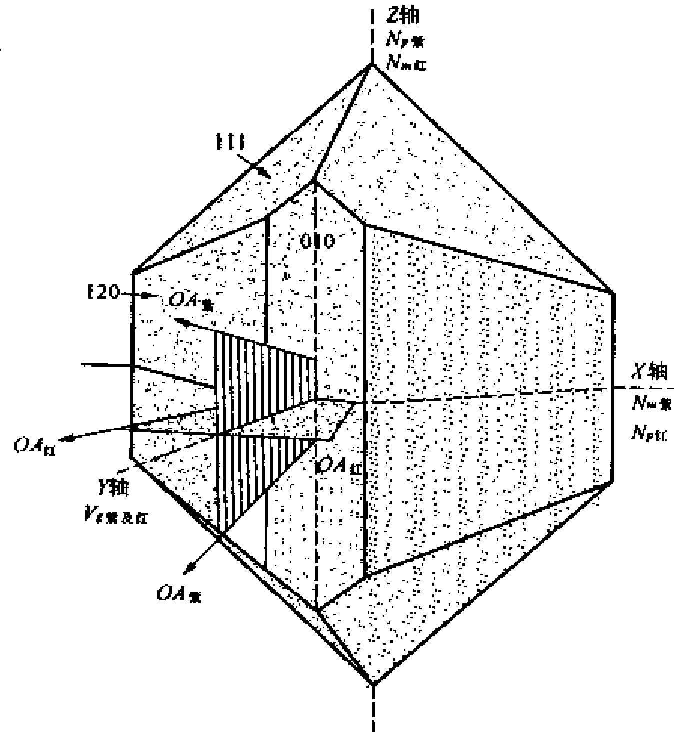


图 4.1.20 板钛矿的正交光轴面色散

(据 E. E. Wahlstrom, 1979)

2 偏光显微镜

偏光显微镜是研究晶体薄片光学性质的重要仪器，比普通生物显微镜复杂，最主要的区别是装有两个偏光镜(图 4.2.1)。其中一个偏光镜在载物台之下，称下偏光镜(起偏镜)；另一个在物镜之上的镜筒中，称上偏光镜(分析镜)。二者透过偏光的振动面通常是互相垂直的。

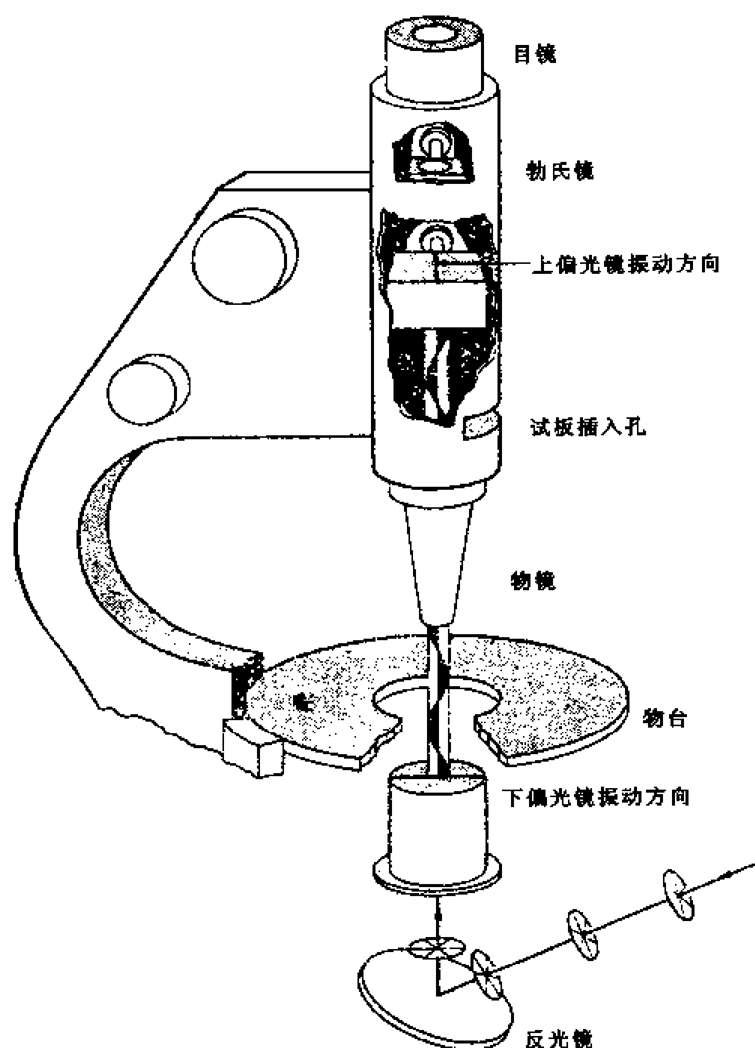


图 4.2.1　偏光显微镜基本构造示意图
(据 F. D. Bloss, 1961)

2.1　偏光显微镜的构造

偏光显微镜型号较多，但基本构造大体相似。本章附两种型号偏光显微镜照片：我国江南光学仪器厂的 XPB—01 型中级偏光显微镜(图 4.2.2)，蔡司文柯型偏光显微镜(图 4.2.3)。下面以 XPB—01 型为重点介绍偏光显微镜的构造。

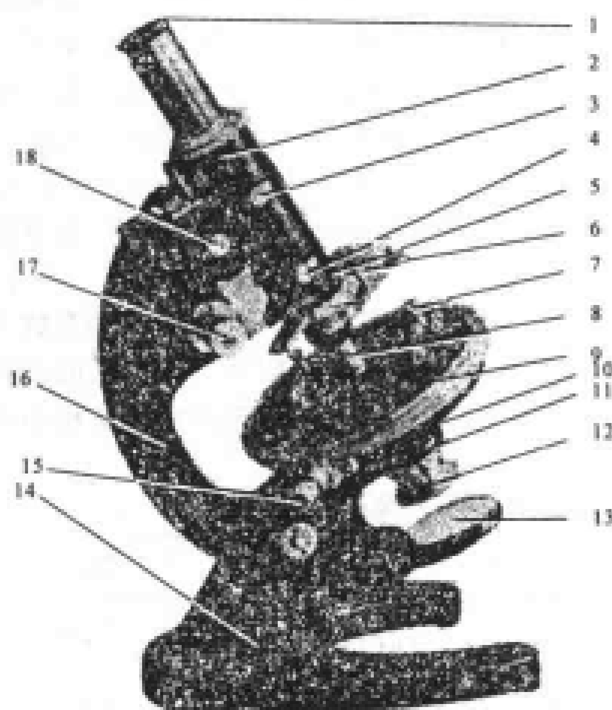


图 4.2.2 江南 XPB—01 型中级偏光显微镜

1—目镜；2—镜筒；3—勃氏镜；4—上偏光镜；5—试板孔；6—物镜夹；7—薄片夹；8—物镜；9—载物台；10—聚光镜；11—锁光圈；12—下偏光镜；13—反光镜；14—镜座；15—载物台固定螺旋；16—镜臂；17—微动调焦螺旋；18—粗动调焦螺旋

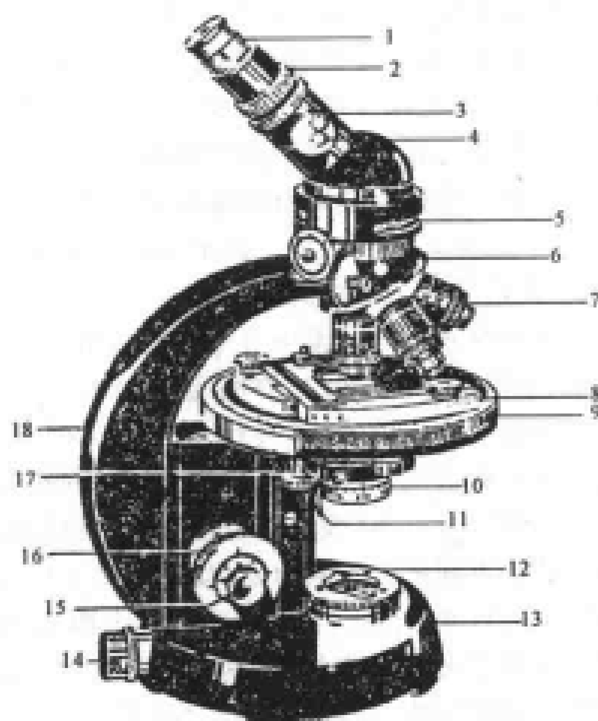


图 4.2.3 蔡司文柯型偏光显微镜

1—目镜；2—镜筒；3—勃氏镜控制器；4—勃氏镜校正螺丝；5—上偏光镜；6—物镜转盘；7—物镜；8—机械台；9—载物台；10—下偏光镜；11—聚光镜小柄；12—调节光盘；13—镜座；14—照明灯；15—微动调焦螺旋；16—粗动调焦螺旋；17—物台固定螺丝；18—镜臂

镜座　支持显微镜的全部重量，其外形为具直立柱的马蹄形。

镜臂　镜臂的下端与镜座相连，呈弯背形。为了使用方便可以向后倾斜，但不宜倾斜过度，以防显微镜翻倒。

反光镜　为具平、凹两面的小圆镜，可以任意转动，以便对准光源，把光反射到显微镜的光学系统中去。使用时应尽量取得所需的亮度。

下偏光镜　位于反光镜之上，由偏光片制成。从反光镜反射来的自然光，通过下偏光镜之后，即成为振动面固定的偏光。下偏光镜一般可以转动，以便调节其振动面方向，通常以符号“*PP*”代表下偏光镜的振动方向。

锁光圈(光阑)　在下偏光镜之上，可以自由开合，用以控制光的透过量，缩小光圈可使光度减弱。

聚光镜　在锁光圈之上，由一组透镜组成。它可以把下偏光镜透出的平行光束聚敛成锥形偏光。不用时可以推向侧面或下降。有的显微镜附有两个数值孔径(*N.A.*)不同的聚光镜。

载物台　为可以水平转动的圆形平台。边缘有刻度(360°)，并附有游标尺，可直接读出转动角度。物台中央有圆孔，是光线的通道。圆孔旁有一对弹簧夹，用以夹持薄片。物台外缘有固定螺丝，用以固定物台。

镜筒　为长的圆筒，联结在镜臂上。转动镜筒上的粗动调焦螺旋及微动调焦螺旋，可使镜

筒上升和下降，用以调节焦距。有的显微镜中，微动调焦螺旋有刻度，可以读出微动调焦螺旋的升降距离，通常是每小格等于 0.01mm 或 0.02mm。镜筒上端插目镜，下端装物镜，中间有勃氏镜、上偏光镜及试板孔，有的还有锁光圈。由目镜上端至装物镜处的长度称机械筒长。物镜后焦平面与目镜前焦平面间的距离称光学筒长。显微镜所附说明书中有光学筒长的数据。

物镜 是决定显微镜成像性能的重要因素，其价值约相当于整个显微镜的 1/5～1/2，是由 1～5 组复式透镜组成。其下端的透镜称前透镜，上端的透镜称后透镜。一般说来，前透镜愈小，镜头愈长，其放大倍率愈大。

每台偏光显微镜至少有 3 个放大倍率不同的物镜，多的可达 17 个。每个物镜均刻有放大倍率、数值孔径（*N.A.*），有的还刻有光学筒长、薄片盖玻璃厚度及前焦距等。一般显微镜附有低倍（3.2×）、中倍（10×）及高倍（45×）物镜及油浸镜头（100×）。使用时按需要选用不同放大倍率的物镜，将其夹于镜筒下端的弹簧夹上。

物镜的光孔角（镜口角或开角） 是指通过物镜前透镜最边缘光线与前焦点间所构成的角度（如图 4.2.4 中的 2θ）。物镜的数值孔径（镜口率、计量光孔、开口率）等于 $\sin\theta$（当物镜与物体之间为空气时），或等于 $n\sin\theta$（当物镜与物体之间为折射率等于 n 的浸油时）。数值孔径缩写为 *N.A.* 或 *A.*。从设计上看，通常是放大倍率愈高，其数值孔径愈大。放大倍率相同的物镜，其数值孔径愈大性能愈好。欲使物镜性能充分发挥其数值孔径相应的效力，必须配合使用数值孔径相当的聚光镜，否则物镜性能将受聚光镜的限制。

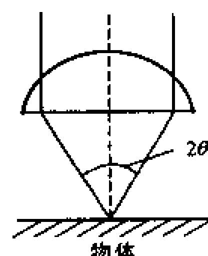


图 4.2.4 物镜的光孔角

目镜 一般有 6×、8× 两个目镜。目镜中附有十字丝及分度尺，有的还附有方格网。

显微镜的总放大倍率等于目镜放大倍率与物镜放大倍率的乘积。例如使用 10× 的物镜和 8× 的目镜，其总放大倍率应为 10×8=80 倍。

上偏光镜 结构与下偏光镜相同，但其振动面常与下偏光镜振动面垂直。通常以符号"*AA*"表示上偏光镜的振动方向。上偏光镜可以自由推入或拉出，有的上偏光镜还可以转动。

勃氏镜 位于目镜与上偏光镜之间，是一个小的凸透镜，可以推入或拉出。有的勃氏镜还可以升降及前后左右移动，并附有锁光圈。在观察细小矿物干涉图时，缩小光圈可挡去周围矿物透出光的干扰，使干涉图更清楚。

除上述主要部件之外，偏光显微镜中还有一些附件：

①测定颗粒大小及矿物百分含量的附件：物台微尺，机械台，六轴计积台，电动计积台等。

②测定矿片上光率体椭圆半径名称及光程差的附件：石膏试板，云母试板，石英楔，贝瑞克补色器，倾斜补色器（K 型和 M 型），亚平行位 λ—试板，布雷斯—凯勒椭圆补色器，谢乃蒙椭圆补色器（亚平行位 λ/4—试板）等。

③精确测定消光位的附件：各种类型的半影板（双石英试板）。这种试板通常与穿孔目镜配合使用。

④精确观察多色性的附件：二色目镜及二色试板等。

以上附件中有些将在以后的有关章节介绍，有些不常用附件请参看有关资料。

2.2　偏光显微镜的调节与校正

2.2.1　装卸镜头

1. 装目镜　将选用的目镜插入镜筒，并使其十字丝位于东西、南北方向。

2. 装卸物镜　因显微镜类型不同，物镜的装卸有下列几种情况：

①弹簧夹型：将物镜上的小钉夹于弹簧夹的凹陷处，即可卡住物镜(图 4.2.2)。

②转盘型：将物镜安装在一个可以转动的圆盘上(图 4.2.3)，再将需用的物镜转到镜筒正下方，恰转至弹簧卡住时为止(即似有阻碍时)。转过头或未转到位置都会使物镜偏离目镜中轴位置。

③螺丝扣型：将选用物镜装在镜筒下端的螺丝扣上，拧紧为止。

2.2.2　调节照明(对光)

装上目镜及中倍物镜(10×或 8×)以后，轻轻推出勃氏镜及上偏光镜，打开锁光圈。目视镜筒内，转动反光镜使对准光源，直至视域最明亮为止。如果视域总是不明亮，则可去掉目镜或推入勃氏镜，观察光源的像。若看不见光源，说明反光镜位置不对或有别的障碍。去掉障碍、转动反光镜，直到光源照亮整个视域或其中央部分为止。再装上目镜或推出勃氏镜，视域必然明亮。注意：不要把反光镜直接对准太阳光，因太阳光太强，易使眼睛疲劳且影响正常观察。

2.2.3　调节焦距(准焦)

调节焦距是为了使物像清晰可见，其步骤如下：

①完成装卸镜头及对光之后，将欲测薄片置载物台中心，并用薄片夹将薄片夹紧。必须使薄片的盖玻璃朝上，否则不能准焦，特别是使用高倍物镜时。

②从侧面看着镜筒，转动粗动调焦螺旋，将镜头下降至最低位置。若使用高倍物镜时，需将镜头下降至几乎与薄片接触为止。

③从目镜中观察，同时转动粗动调焦螺旋使镜筒缓缓上升。至视域内物像基本清楚，再转动微动调焦螺旋，直到视域内物像完全清晰为止。

准焦以后，物镜前端与薄片平面之间的距离称工作距离，此数值在显微镜所附说明书中能查到。工作距离与物镜放大倍率有关。一般是物镜的放大倍率愈小，其工作距离愈长；物镜放大倍率愈大，其工作距离愈短(图 4.2.5)。

调节焦距时，绝不能眼睛看着镜筒内而下降镜筒。因为这样很容易使镜头与薄片相碰，不仅压碎薄片且损坏镜头。使用高倍物镜时，尤应注意。因为高倍物镜的工作距离很短，准焦后镜头几乎与薄片平面接触。如果薄片上的盖玻璃朝下放时，不但根本不能准焦，而且最易发生压碎薄片及损坏物镜事故。初学者最好先用低倍或中倍物镜准焦后，再用高倍物镜准焦。

此外，在进行显微镜工作时，要学会用两眼同时睁开看，这样既可以保护视力，又便于绘图及记录。

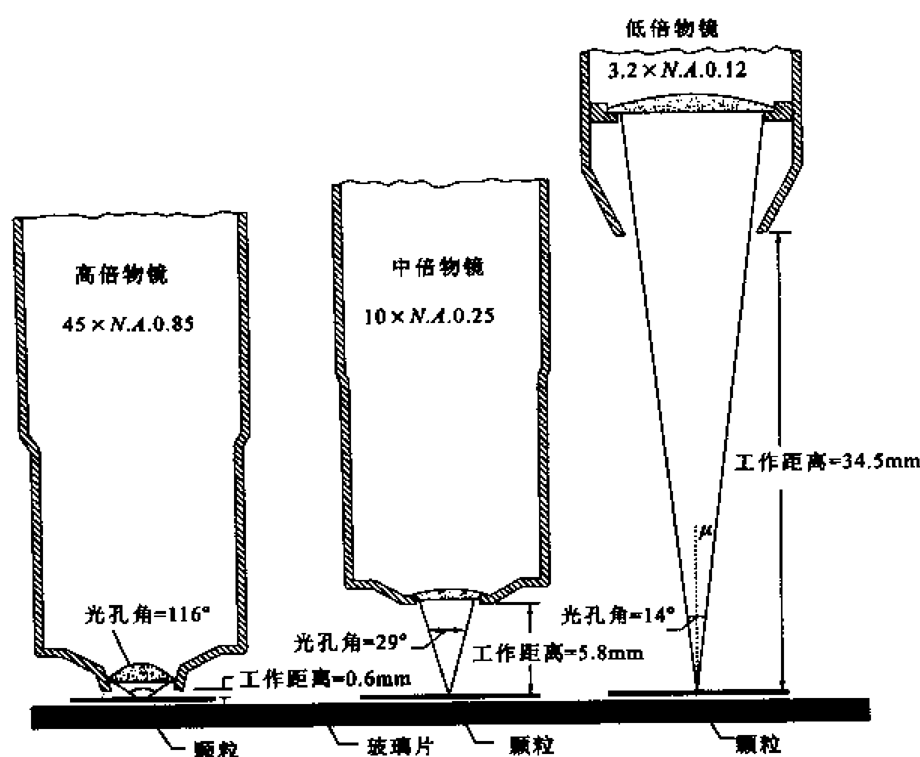


图 4.2.5　物镜的工作距离、光孔角、数值孔径对比图

(据 F. D. Bloss, 1961)

2.2.4　校正中心

在显微镜的光学系统中，载物台旋轴、物镜中轴及目镜中轴应当严格在一条直线上。此时，旋转物台，视域中心(目镜十字丝交点)的物像不动，其余物像绕视域中心做圆周运动(图 4.2.6)。如果它们不在一条直线上，当旋转物台时，视域中心的物像将离开原来位置，连同其他部分的物像绕另一中心旋转(图 4.2.7 中的 O 点)，这个中心代表物台旋转轴出露点位置。这样不仅有可能把视域中的某些物像转出视域之外，妨碍观察；而且将影响某些测定数据的精度。特别是使用高倍物镜时，则根本无法观察。因此必须校正中心，使目镜中轴、物镜中轴与载物台旋转轴吻合。

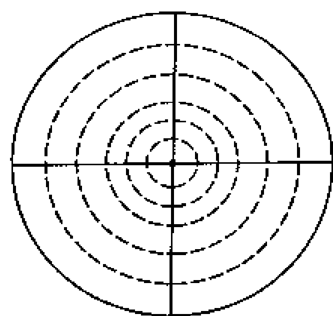


图 4.2.6　物镜中轴、目镜中轴与物台旋转轴在一条直线上时，旋转物台视域内物像移动情况

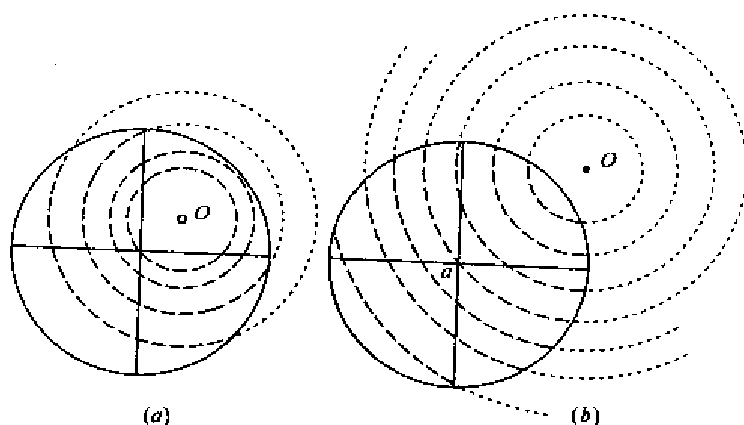


图 4.2.7　物镜中轴、目镜中轴与物台旋转轴不吻合时，转动物台时视域内物像的移动情况

(a)物台旋转轴出露点 O 在视域内；

(b)物台旋转轴出露点 O 在视域外

在显微镜中，目镜中轴是固定的，大多数载物台中轴也是固定的。在实际工作中，一般只能校正物镜中轴，有少数显微镜的物台中轴亦能校正。校正物镜中轴通常是借助于安装在物镜上的两个校正螺丝进行校正。蔡司文柯型显微镜是用安装在物镜上的两个螺丝环校正。

校正中心之前，必须首先检查物镜安装位置是否正确。如果物镜没有安装在正确位置上，不但不能校正好中心，而且容易损坏校正螺丝。在校正中心时，如果发现校正螺丝扭动困难或扭不动时，切勿强行扭动，应立即检查原因并与实验室管理人员或教师联系。

校正中心的具体步骤如下：

(1)将物镜安装在正确位置上。准焦后，在薄片中选一质点 a。移动薄片，使质点 a 位于视域中心的十字丝交点(图 4.2.8(a))。

(2)将薄片固定。旋转载物台，若中心不正，则质点 a 必围绕另一中心做圆周运动(图 4.2.8(b))。其圆心 O 点即为载物台旋转轴出露点。

(3)旋转载物台 180°，使质点 a 由十字丝交点移至 a' 处(图 4.2.8(c))。

(4)扭动物镜上的校正螺丝，使质点由 a' 处移至偏心圆的圆心 O 点(图 4.2.8(d))。

(5)移动薄片，使质点由 O 点移至十字丝交点(图 4.2.8(e))。旋转载物台，若质点不动(图 4.2.8(e))，则中心已校正好。若质点仍离开十字丝交点绕另一较小偏心圆移动，则没有完全校正好。必须按上述方法重复校正，直到完全校正好为止。

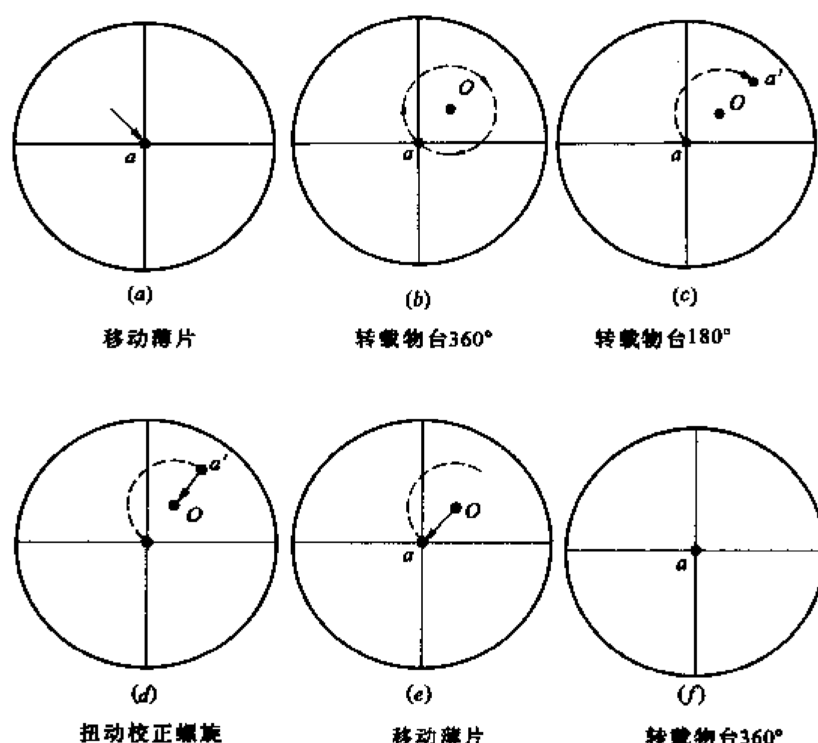


图 4.2.8 校正中心步骤示意图

(6)若中心偏离很大，旋转物台时，质点 a 由十字丝交点移至视域之外(图 4.2.7(b)及图 4.2.9)，根据质点移动情况，估计偏心圆圆心 O 点在视域外的位置及偏心圆半径长短，然后将质点转回十字丝交点。扭动物镜上的校正螺丝，使质点由十字丝交点向偏心圆圆心 O 点相反方向移动大约相当于偏心圆半径的距离(图 4.2.9)。再移动薄片，使质点回到十字丝交点处。转动载物台，质点有可能在视域内移动。此时可按上述中心偏离较小的方法校正。如果中心

仍偏离较大，质点移出视域之外，按偏心大的方法再进行校正，经过3～4次校正之后，中心仍偏离较大，则应当检查原因或报告老师。

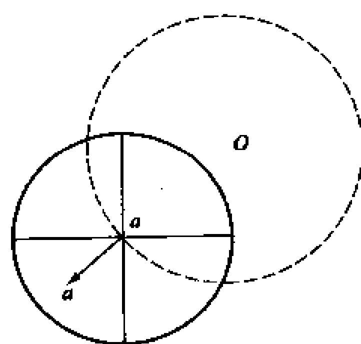


图4.2.9 中心偏离较大时，校正中心的示意图

2.2.5 视域直径的测定

①测量中倍或低倍物镜的视域直径，可以直接用带刻度的三角板或透明尺测定。测定时，将它们置载物台上，对准焦点后，观察视域直径的长度值，记录其数值备以后查用。

②测定高倍物镜的视域直径，可用物台微尺测量。物台微尺总长度为1～2mm，其中刻有100～200个小格，嵌在一个玻璃片上，每小格相当于0.01mm。

测定时将物台微尺置载物台上，对准焦点，观察视域直径相当于微尺的多少小格。若为20小格，则视域直径等于20×0.01mm=0.2mm。

2.2.6 目镜十字丝的检查

测定某些光学性质时，目镜十字丝是否正交较为重要。检查时，先将具有直边的矿物颗粒置视域中心，并使矿物的直边与目镜十字丝横丝平行，记录载物台读数；转载物台90°，观察矿物直边是否与目镜十字丝纵丝平行(图4.2.10)。如果平行，说明目镜十字丝是正交的；如果不平行，说明目镜十字丝不正交，需作专门修理。

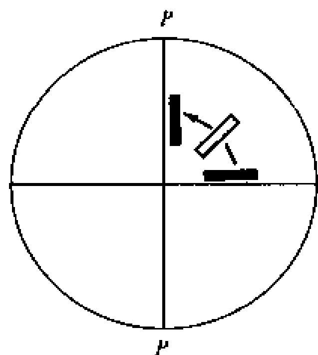


图4.2.10 目镜十字丝的检验

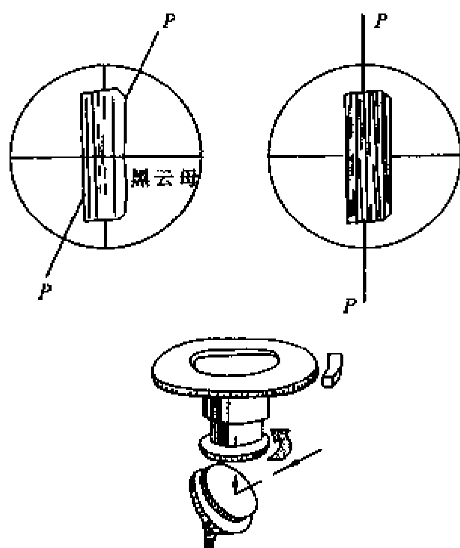


图4.2.11 下偏光镜振动方向的确定与校正

2.2.7 偏光镜的校正

在偏光显微镜的光学系统中，上、下偏光镜振动方向应当正交，而且是东西、南北方向，并分别与目镜十字丝平行。其校正方法如下：

1. 确定下偏光镜的振动方向

在薄片中找一个具极完全解理缝的黑云母置视域中心。转动载物台，使黑云母颜色变得

最深为止。此时黑云母解理缝方向即代表下偏光镜振动方向(因光波沿黑云母解理缝方向振动时,吸收最强,颜色最深)。如果黑云母解理缝方向与目镜十字丝之一平行,则下偏光镜位置正确,不需要校正。如果不平行,转动物台使黑云母解理缝方向与目镜十字丝之一平行(图4.2.11),旋转下偏光镜至黑云母颜色变至最深为止。

2. 检查上、下偏光镜振动方向是否正交

推入上偏光镜,若视域黑暗,证明上、下偏光镜振动方向正交。若视域不黑暗,说明上、下偏光镜振动方向不正交,则需要校正上偏光镜。如果上偏光镜能转动,则转动上偏光镜至视域黑暗为止(相对黑暗)。如果上偏光镜不能转动,则需要修理人员作专门校正。

经过上述两种校正之后,目镜十字丝应当严格与上、下偏光镜振动方向一致。但有些显微镜的目镜没有定位螺丝,在使用过程中或更换目镜时,可能使目镜十字丝位置改变,因而需要单独校正目镜十字丝位置。

3. 检查目镜十字丝是否严格与上、下偏光镜振动方向一致

①在岩石薄片中选一个具极完全解理缝的黑云母置视域中心,转动载物台,使黑云母解理缝与目镜十字丝之一平行。

②推入上偏光镜,如果黑云母变黑暗(消光),说明目镜十字丝分别与上、下偏光镜振动方向平行。如果黑云母不全黑,转动载物台使黑云母变黑暗。推出上偏光镜,转动目镜,使十字丝之一与黑云母解理缝平行。此时目镜十字丝即与上、下偏光镜振动方向一致。

2.3 岩石薄片磨制法简介

在偏光显微镜下研究岩石和矿物,需要磨制成薄片进行观察。

用切片机从岩石标本上切下一小岩块(定向或不定向),先把一面磨平,用加拿大树胶把这一平面粘在载玻璃片上(其大小为 25mm × 50mm,厚约 1mm)。再磨另一面,磨至厚度0.03mm 为止,用加拿大树胶把盖玻璃粘在它的表面(盖玻璃大小为 15mm × 15mm 至 20mm × 20mm,厚度为 0.1～0.2mm)。因此,岩石薄片是由薄的矿片、载玻璃片与盖玻璃片组成。矿片的顶、底部都涂有薄的加拿大树胶(图 4.2.12)。

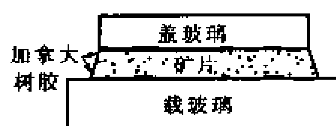


图 4.2.12 岩石薄片纵剖面

在磨制薄片时使用金刚砂,无论金刚砂多细,矿片表面总会磨划成沟痕(显微沟痕)。因此,矿片表面并不是绝对平滑。

为了某种需要,如观察长石的解理缝、薄片染色等,对某些薄片可以不加盖玻璃片。

疏松岩石标本在磨制薄片时,需先浸在加拿大树胶中煮过以后再切制成薄片。

3 单偏光镜下的晶体光学性质

3.1 单偏光镜的装置及特点

所谓单偏光镜下的研究，就是在观察、测定矿片的光学性质时只使用下偏光镜。由反光镜反射来的自然光波，通过下偏光镜之后，变成振动方向平行下偏光镜振动方向 PP 的偏光(图 4.3.1(a))。当载物台上非均质矿片的光率体椭圆长短半径之一与 PP 方向平行时，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，进入矿片后沿该半径方向振动通过矿片，未改变原来的振动方向(图 4.3.1(b)，此时矿片的折射率值等于该半径的长短。当矿片的光率体椭圆长短半径与 PP 斜交时，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，进入矿片后，发生双折射，分解形成振动方向平行光率体椭圆长短半径的两种偏光(图 4.3.1(c))，其折射率值分别等于椭圆长短半径，二者在矿片中的传播速度不同。

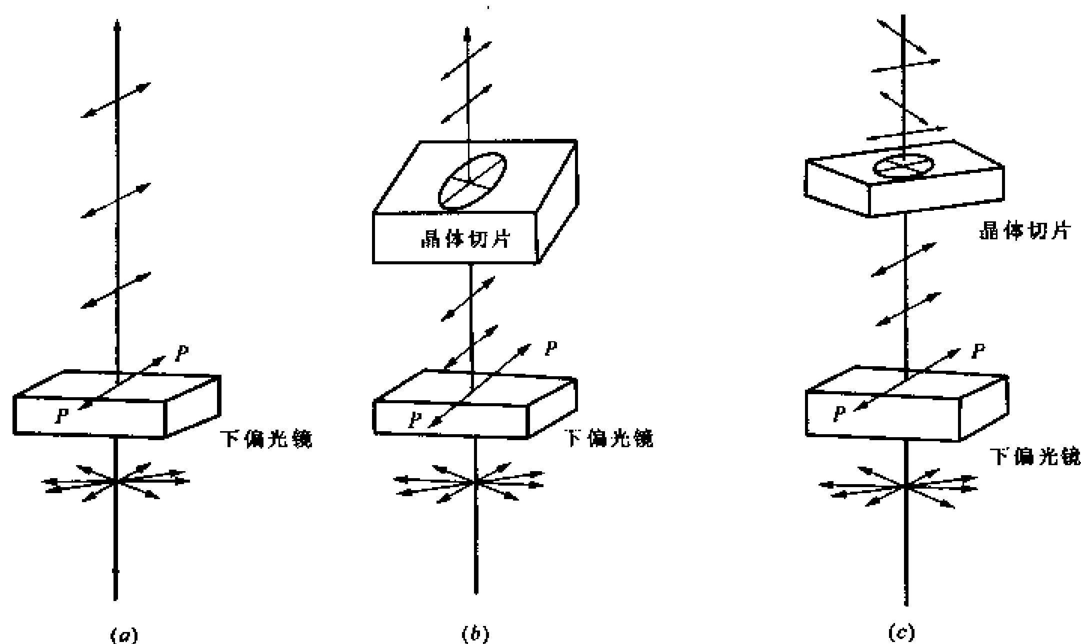


图 4.3.1 单偏光镜的装置及光通过下偏光镜与非均质体矿片的情况

单偏光镜下观察、测定的主要光学特征有：矿物的外表特征，如形态、解理等；与矿物对光波吸收有关的光学性质，如颜色、多色性；与矿物折射率值大小有关的光学性质，如突起、糙面、边缘、贝克线及色散效应等。

3.2 矿物的形态及解理

3.2.1 矿物的形态

每一种矿物都有一定的结晶习性，构成一定的外表形态，如石榴石常呈菱形十二面体，角闪石常呈单斜柱状。此外，矿物的形态、大小及晶体的完整程度等，常常与形成条件、晶出顺序有密切联系。所以研究矿物的形态，不仅有助于鉴定矿物，还可帮助我们推断它们的形成条件。

岩石薄片中所见到的矿物形态，并不是矿物晶体的整个立体形态，而是晶体某一方向切面的轮廓。同一晶体不同方向的切面，其外形轮廓可以截然不同。例如一个立方体(图 4.3.2)，因切面方向不同，切面的形状可以是正方形、三角形、六边形、长方形以及其他不规则的形状。

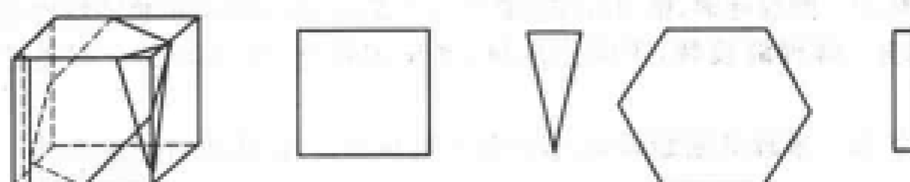


图 4.3.2 矿物外形与切面方向的关系

所以在薄片鉴定工作中，必须仔细观察晶体各个方向的切面，结合晶面夹角、解理性质等特征，并运用矿物学、结晶学的知识综合判断矿物的形态。

在岩石薄片中，矿物常呈集合体出现，集合体中，矿物表现出一定的形态，常见的有以下几种，如图 4.3.3 所示：等向粒状，如石英；针状，如金红石、矽线石；板条状，如蓝晶石；柱状，如角闪石、辉石；板状，如重晶石、石膏；纤维状，如石棉、纤维蛇纹石；片状，如云母、绿泥石；放射状，如某些电气石、葡萄石晶体呈放射状排列；球粒状，如某些玉髓晶体呈球粒状；网状，如蛇纹岩中的蛇纹石；文象状，如石英与钾长石呈文象交生体；雏晶状，如某些火山玻璃中出现的各种式样的雏晶。

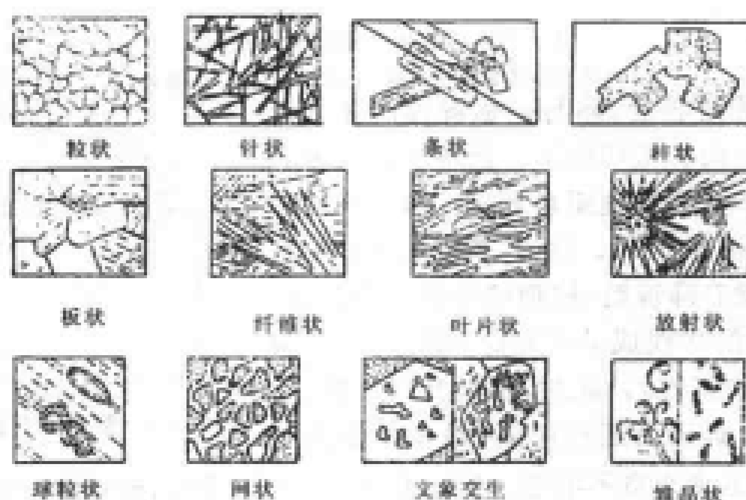


图 4.3.3 集合体中矿物的形态

因此，在岩石薄片中，要确定矿物的形态，切不可只凭个别矿物颗粒的外形就下结论，必须多观察，仔细地分析、比较，并结合标本上矿物的形态，才能作出切合实际的判断。

3.2.2 解理

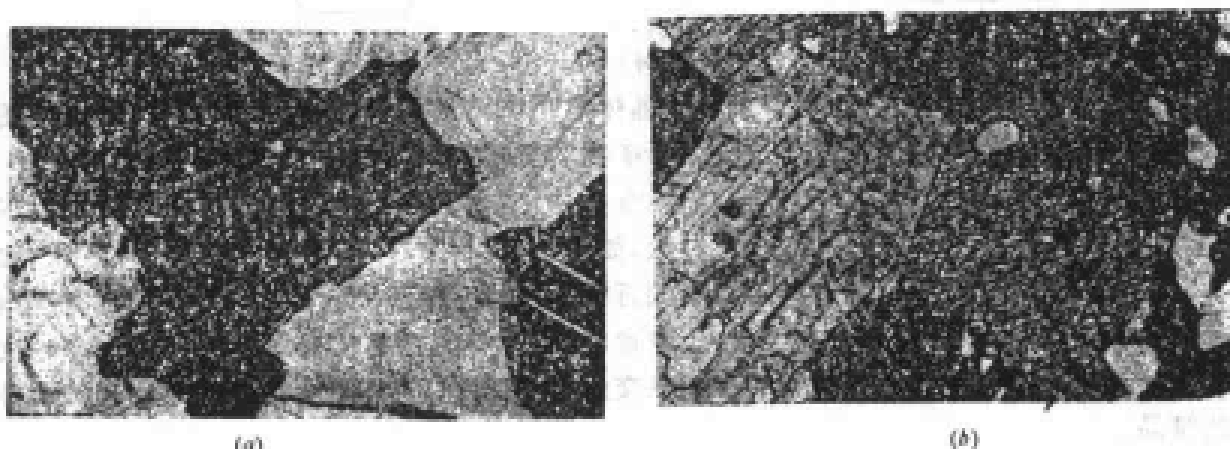
许多矿物都具有解理。不同的矿物，其解理方向、完全程度、组数及解理夹角常各不相同，所以解理是鉴别矿物的重要特征之一。同时解理面的方向还往往与晶面、晶轴有一定的联系，故解理还可以作为测定某些光学常数的辅助条件或根据。

在磨制薄片时，由于机械力的影响，使解理张开形成细缝，加拿大树胶得以充填其中。由于矿物折射率与加拿大树胶折射率不同，光透过时发生折射、反射作用而使这种解理细缝显示出来。因此矿物的解理在薄片中表现为沿一定方向平行排列的细缝，称为解理缝。缝与缝间的间距往往是大致相等的。解理的完全程度不同，解理缝的特征，如宽度、清楚程度及缝间距离等也不同。根据解理的完全程度，可将其划分为以下三级：

①极完全解理　解理缝细、密、长，往往贯穿整个晶体，如云母类矿物的解理(图 4.3.4(*a*))。

②完全解理　解理缝较稀，不完全连贯，如角闪石类、辉石类及长石类矿物的解理(图 4.3.4(*b*))。

③不完全解理　解理缝断断续续，有时仅见解理痕迹，如橄榄石的解理。



(*a*)　　(*b*)

图 4.3.4　不同矿物的解理等级

(*a*)黑云母的极完全解理；(*b*)角闪石的完全解理

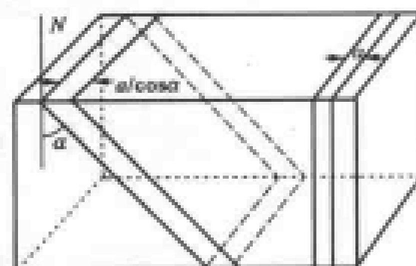


图 4.3.5　解理缝宽度与切片方向的关系

解理缝的宽度、清楚程度，除与矿物解理的完善程度有关外，还与切片方向有密切联系。当解理面与岩石薄片平面的法线一致时(即解理面垂直岩石薄片平面)，解理缝最细、最清楚(图 4.3.5)。这时，若使解理缝平行目镜十字丝竖丝，稍微升降镜筒，解理缝不向左右移动。当解理面与薄片平面的法线成 α 夹角时(图 4.3.5)，解理缝变宽(大于真正的宽度)。此时，稍微升降镜筒，则解理缝向左右移动。解理面逐渐倾斜，即 α 角逐渐加大，解理缝逐渐变宽，且愈来愈不清楚。当 α 角增至一定限度时，解理缝就看不见了，这个夹角称为解理缝可见临界角，其大小与矿物和加拿大树胶的折射率差值有关，差值愈大，解理缝可见临界角也愈大。因而解理缝的可见性还与矿物折射率与加拿大树胶折射率的差值有关。

B. N. 洛多契尼科夫举出一些矿物解理缝可见临界角的近似值：

$N \approx 1.70$ 左右的矿物(辉石类等)，约等于 30°。

$N \approx 1.65$ 左右的矿物(角闪石类等)，约等于 25°。

$N \approx 1.60 \sim 1.55$ 左右的矿物(云母、斜长石类等)，约等于 10°～20°。

由上可知：不同的矿物，当其折射率值相差较大时，虽具有相同组数的解理，但因其解理可见临界角的大小不同，在薄片中见到解理缝的机会是不同的。如辉石和斜长石都具有两个方向的解理，而斜长石在薄片中见到解理缝的机会就少得多。同一矿物不同方向的切面，解理缝的可见性、宽度、组数也是不同的。如角闪石虽具有两组解理，但在薄片中，有些切面上只见一组解理缝，另一些切面上看不见解理缝，只有垂直 Z 轴或近于垂直 Z 轴的切面才可见到两组解理缝，并且只有垂直 Z 轴切面上两组解理缝间的夹角才是真正的解理夹角。因此，在镜下观察矿物的解理时，切不可以个别或少数切面判断矿物解理的有无、完善程度、组数，必须多观察一些切面，综合判断。

此外，矿物颗粒上还可能存在一些裂缝，在薄片中这些裂缝一般表现为弯曲或不规则的细缝，有时也可以较细密而平直，但其缝与缝之间的距离往往不等。观察时应结合所具有的矿物学、结晶学知识来区别它们。

3.2.3 解理夹角的测定

当矿物具有两组解理时，测定其夹角可以帮助我们鉴定矿物。

解理夹角在晶体上本来是一定的，但在矿物切片上，由于切片方向不同，其夹角的大小有一定差异(图 4.3.6)。只有同时垂直两组解理面的切面，才是两组解理真正的夹角。因此测定两组解理夹角时，必须选择同时垂直两组解理面的切面。这种切面的特征是：两组解理缝最细最清楚，当其解理缝平行目镜十字丝竖丝时，稍微升降镜筒，解理缝不向左右移动。

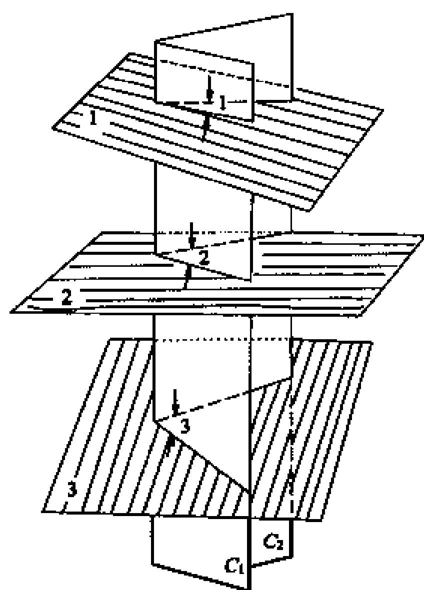


图 4.3.6 解理夹角与切面方向的关系

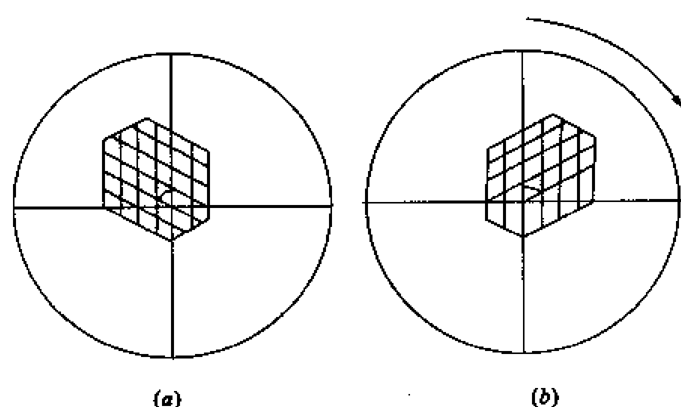


图 4.3.7 解理夹角的测定

测定方法：

①按上述原则选择合格的切面。

②转动载物台，使一组解理缝平行目镜十字丝竖丝(图 4.3.7(a))，在载物台刻度盘上读

数为 a。

③旋转载物台，使另一组解理缝平行目镜竖丝(图 4.3.7(b))，载物台读数为 b。两次读数之差(a 与 b 之差)即为所测得的夹角。

3.3 薄片中矿物的颜色与多色性、吸收性

显微镜下所观察到的是矿物在薄片中呈现的颜色，与手标本上肉眼观察到的颜色常有所不同。前者是在透射光中观察，是透过矿物而未被吸收的部分色光所呈现的颜色；后者则是在反射光方向进行观察，是反射、散射结果所形成的颜色。晶体光学中则主要是研究矿物在薄片中所呈现的颜色。

3.3.1 矿物的颜色

当光透过矿物薄片时，不管矿物如何透明，总是要吸收一部分。如果矿物对白光中的各色光波同等吸收，透过矿物后仍为白光，只是强度有所减弱，此时矿物不具颜色，称为无色矿物。如果矿物对白光中的各种色光吸收程度不等，则透出矿片的各种色光强度比例将发生改变，因而矿片呈现特定的颜色。矿物对白光中各色光波的不等量吸收，称选择吸收。所以，在显微镜下，矿物在薄片中呈现的颜色是矿片对光波选择吸收的结果。

矿片对白光中各种色光选择吸收后所呈现的颜色，遵从色光的混合—互补原理。如图 4.3.8 所示，红、绿、蓝三种色光称原色光。这三种原色光按不同比例混合，就可得到白光中除红光、绿光、蓝光以外的其他主要色光，如橙、黄、青、紫等色光。例如三种原色光中，红光与绿光，红光与蓝光，绿光与蓝光，以等比例两两混合，则相应地产生黄光、品红光及青光。若改变这三种原色光混合的比例，则可产生其他颜色的光。例如红光多于绿光混合形成橙光；蓝光多于红光混合形成紫光等。

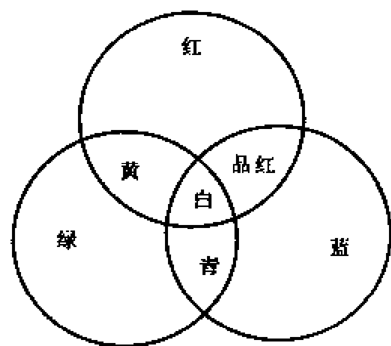


图 4.3.8　三原色互补原理示意图

当两种色光混合后呈现白色，则称这两种色光为互补色光。红光与青光、绿光与品红光、蓝光与黄光等都是互补色光。

因此，薄片中矿物呈现的特定颜色，是透过矿片的色光按上述原则混合的结果。例如矿物对白光中的黄光全部吸收，对其他色光吸收程度相近，矿物就呈现蓝色。

此外，矿物在薄片中呈现的颜色还与矿物的其他性质有关，特别与所含的某些色素离子有关。例如含 Fe^{2+} 常呈浅绿色(钙铁辉石)，含 Fe^{3+} 呈红色(玄武角闪石)，含 Mn^{3+} 呈浅红色(红帘石)，含 Cr^{3+} 呈亮绿色(铬透辉石)等等。总之影响矿物呈现颜色的因素是多方面的，如矿物中含有 OH^- 与否会影响 Fe^{2+} 离子的呈色作用，黑云母、普通角闪石、普通辉石内均含有 Fe^{2+}，但前两者含 OH^-，呈现明显的颜色，而普通辉石则近于无色。

至于矿物颜色的深浅，则取决于矿物对各色光波吸收的总强度。吸收的总强度大，颜色就深，反之颜色就浅。而吸收的总强度又决定于矿物本身的性质和薄片厚度，对同一矿物来说，薄片愈厚颜色愈深。

均质体矿物的光学性质各方向一致，不同振动方向光波的选择吸收和吸收的总强度相同，

所以均质体矿物薄片的颜色及颜色深浅，各方向相同，不因光波在晶体中的振动方向不同而发生改变。

3.3.2　多色性与吸收性

非均质体矿物的光学性质因方向而异，对光波的选择吸收及吸收总强度也随方向而异。因此，在单偏光镜下旋转载物台时，许多有色非均质体矿物薄片的颜色及颜色深浅要发生变化。这种由于光波在晶体中的振动方向不同，而使矿片颜色发生改变的现象称为多色性，颜色深浅发生改变的现象称为吸收性。

一轴晶矿物有两个主要的颜色，分别与 N_e、N_o 相当。兹以黑电气石为例说明一轴晶矿物的多色性现象(图 4.3.9)。

黑电气石平行 Z 轴切片的光率体椭圆长短半径分别为 N_o 与 N_e，因系负光性，其 $N_o > N_e$。将这种切片置单偏光镜下，当矿片上光率体椭圆的短半径 N_e(即 Z 轴方向)平行下偏光镜振动方向 PP 时(图 4.3.9(a))，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，进入矿片后沿 N_e 方向振动(在 N_o 方向的振幅为零)，矿片呈现浅紫色。这种颜色是光波在晶体中沿 N_e 方向振动时，矿片对光波选择吸收后透出矿片的色光形成的。

旋转载物台 90°，使矿片上光率体椭圆的长半径 N_o 平行下偏光镜振动方向 PP(图 4.3.9(b))，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，进入矿片后沿 N_o 方向振动，矿片呈现深蓝色。这种颜色是光波在晶体中沿 N_o 方向振动时，矿片对光波选择吸收后透出矿片的色光形成的。

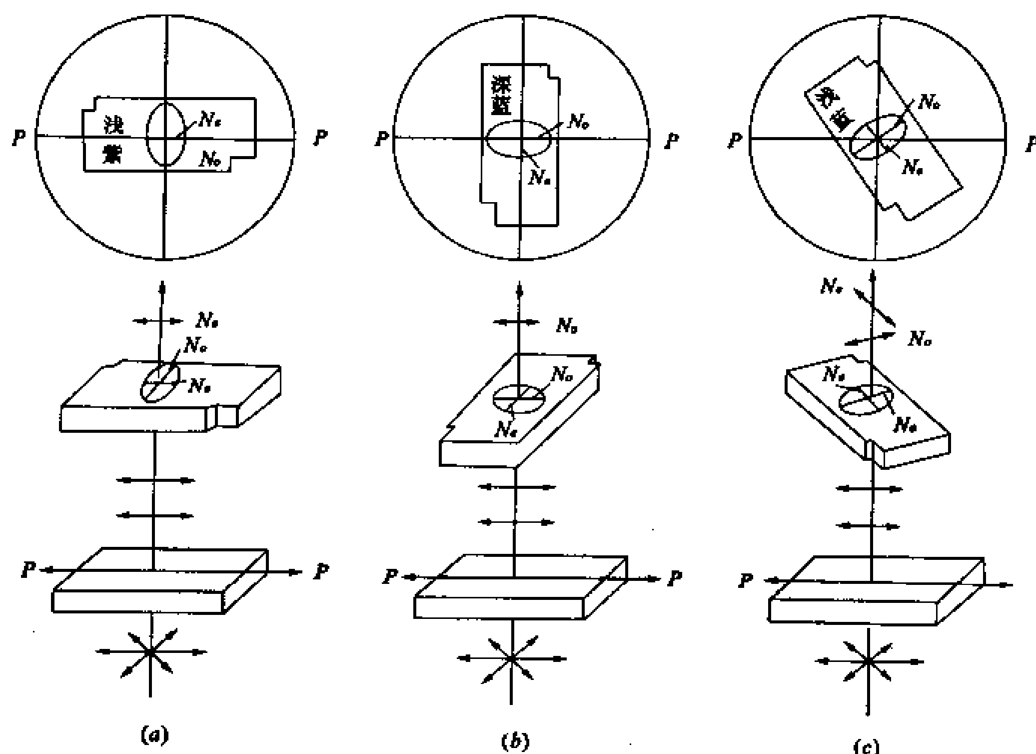


图 4.3.9　电气石平行 Z 轴切片的多色性现象

当矿片上光率体椭圆的长短半径 N_o、N_e 与下偏光镜振动方向 PP 斜交时(图 4.3.9(c))，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光进入矿片后，发生双折射，分解形成两种偏光，一种偏

光的振动方向平行 N_e，另一种偏光的振动方向平行 N_o，因此矿片显示浅紫与深蓝的过渡色。

黑电气石垂直 Z 轴（光轴）切片的光率体切面为圆切面，其半径为 N_o。将这种切面置于单偏光镜下，矿片显深蓝色。旋转物台颜色不发生变化。斜交光轴切片颜色的变化没有平行光轴切面显著。一轴晶矿物如黑电气石的多色性记录方式是：

$$N_o=\text{深蓝色},N_e=\text{浅紫色（多色性公式）}$$

因 N_o 的颜色比 N_e 深，表示光波沿 N_o 方向振动时总吸收强度大，故其吸收性是：

$$N_o>N_e\text{（吸收性公式）}$$

二轴晶矿物有 3 个主要的颜色，分别与光率体 3 个主轴 N_g、N_m、N_p 对应。平行光轴面的切面显示 N_g、N_p 的颜色，其多色性最明显；垂直光轴的切面，只显示 N_m 的颜色，不具多色性；垂直 Bxa 的切面显示 N_m、N_p（正光性）或 N_m、N_g（负光性）的颜色，其多色性明显程度介于前两种切面之间。显然测定二轴晶矿物的多色性，至少需要两个方向的切面。以普通角闪石为例，其多色性公式记录方式如下：

$$N_g=\text{深绿色或深蓝绿色},N_m=\text{绿色},N_p=\text{浅黄绿色}$$

吸收性公式：$N_g>N_m>N_p$，称正吸收；如果与此相反，$N_p>N_m>N_g$，则称反吸收。

非均质体矿物中，不同矿物的多色性明显程度往往是不同的，有的矿物多色性极为明显，如黑云母；有的矿物多色性不太明显，如紫苏辉石；有的非均质体矿物看不出多色性。矿片多色性的明显程度除与矿物的本性有关外，还与切片方向有关。因此同一矿物，切片方向不同，多色性的明显程度也不相同，一般是平行光轴（一轴晶）或平行光轴面（二轴晶）切片的多色性最明显，垂直光轴切片不具多色性，其他方向切片的多色性明显程度介于二者之间。此外，多色性的明显程度还与薄片厚度有关，薄片愈厚，多色性愈明显，所以观察矿物的多色性时，不能只凭个别颗粒下结论。测定多色性公式必须在定向切片上进行，其测定方法在以后的系统鉴定部分介绍。

3.4 薄片中矿物的边缘、贝克线、糙面及突起

这一节主要介绍岩石薄片中相邻两物质间，由于折射率不同而发生折射、反射所引起的一些光学现象。

3.4.1 矿物的边缘与贝克线

在两个折射率不同的物质接触处，可以看到比较黑暗的边缘，称矿物的边缘。在边缘的附近还可见到一条比较明亮的细线，升降镜筒，亮线发生移动，这条较亮的细线称为贝克线或光带（图 4.3.10）。



图 4.3.10 矿物的边缘和贝克线

边缘和贝克线产生的原因主要是由于相邻两物质折射率值不等，光通过接触界面时，发生折射、反射作用所引起的（图 4.3.11）。根据两物质接触关系不同，可以分为下列几种情况：

相邻两物质倾斜接触时，如果折射率大的物

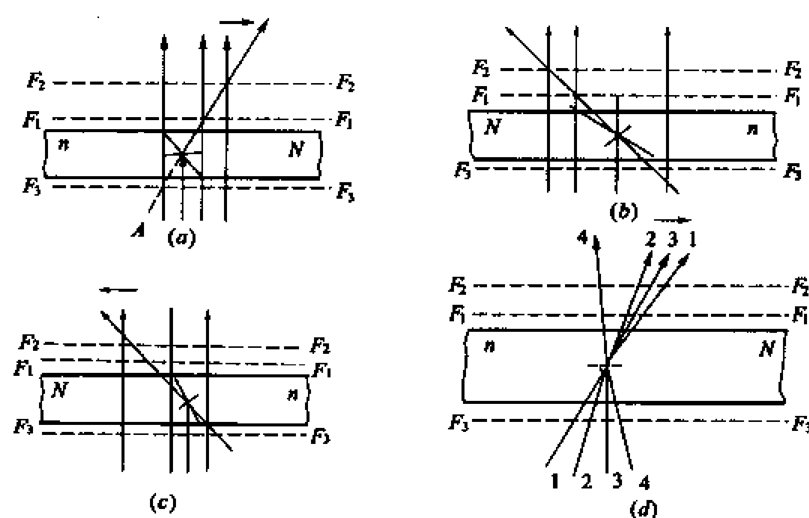


图 4.3.11　贝克线的成因及贝克线的移动规律

质盖于折射率小的物质之上(图 4.3.11(a)),无论接触界线的倾斜度如何,光线在接触处均向折射率高的一方折射;如果折射率小的物质盖于折射率大的物质之上,当接触面较缓时(图 4.3.11(b)),光波在接触处仍向折射率高的一方折射;当接触面较陡时(图 4.3.11(c)),部分入射光的入射角大于全反射临界角,在接触界面处发生全反射。当两物质垂直接触时(图 4.3.11(d)),垂直入射光不发生折射,但略为倾斜的光线发生折射与全反射,光仍在折射率大的物质边缘集中。由上可知,无论两物质的接触关系如何,光线通过接触界面发生折射、全反射作用,使接触界线的一边光线相对减少,而显现出较暗的边缘,其粗细与黑暗程度,取决于两种物质折射率的差值大小,差值愈大边缘愈粗愈黑暗。而在接触界线的另一边,光线相对增多而形成贝克线。如果慢慢提升镜筒,从焦点平面 F_1F_1 徐徐上升至 F_2F_2,所观察到的光线集中部分(贝克线)向折射率大的一方推移;降低镜筒至焦点平面 F_3F_3,则光线集中的部分(贝克线)向折射率小的一方推移。所以,贝克线的移动规律是:提升镜筒,贝克线向折射率大的物质移动;下降镜筒,贝克线向折射率小的物质移动。根据贝克线的移动规律,可以确定相邻两物质折射率的相对大小。贝克线的灵敏度较高,两物质折射率相差在 0.001 时,贝克线仍清楚。如用单色光灵敏度可达 0.0005,这样的精确度在岩石薄片鉴定中已经够用了。观察贝克线时,把两物质的接触界线置于视域中心,适当缩小光圈,以挡去倾斜度较大的光线,使视域变得较暗,贝克线将显得更为清楚。

当矿物折射率与相邻介质折射率相差很大时,薄片较厚或矿物的解理发育时,在矿片边缘附近有时还可能产生另一条亮线。提升或下降镜筒时,其移动方向与贝克线相反,这条亮线称为假贝克线(false becke line)。它是由于两种物质接触面上光的反射或内反射作用形成的。当入射光高度汇聚,物镜光孔角很大时,假贝克线特别明显。因此,换用光孔角小的物镜,使入射光近于平行,可使假贝克线消除或减弱。

当两种物质折射率相差较小,在白光下观察时,由于折射率色散的影响,在两种折射率相差不大的无色矿物的界线附近,有时贝克线发生了变化,变成有色的细条带。在折射率较低的一边,出现橙黄色细线,折射率较高的矿物一边出现浅蓝色细线。这种现象称为洛多契尼科夫色散效应。利用色散效应可以直接判断相邻两种矿物折射率的相对大小。在观察色散效应时,适当缩小光圈,可以使色散效应显得更清楚。

3.4.2 矿物的糙面

在单偏光镜下观察各个矿物的表面时，可以看到某些矿物表面较为光滑，某些矿物表面显得较为粗糙而呈麻点状，好像粗糙皮革一样，这种现象称为糙面。

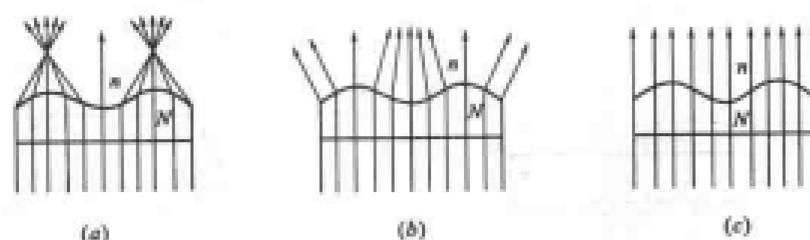


图 4.3.12 糙面的形成原因

(a)矿物折射率>加拿大树胶的折射率($N>n$)；(b)矿物折射率<加拿大树胶的折射率($N<n$)；(c)矿物折射率=加拿大树胶的折射率($N=n$)

糙面产生的主要原因是：矿物薄片表面具有一些显微状的凹凸不平，覆盖在矿片之上的加拿大树胶折射率又与矿片折射率不相同。光线通过两者之间的界面，将发生折射，甚至全反射作用，致使矿片表面的光线集散不一(图 4.3.12)，而显得明暗程度不相同，给人以粗糙的感觉。

显然，糙面的明显程度取决于矿物折射率与加拿大树胶折射率差值大小及矿片表面的磨光程度；一般是两者折射率的差值愈大，矿片表面的磨光程度愈差，其糙面愈明显。

3.4.3 矿物的突起

在岩石薄片中，各种不同的矿物表面好像高低不相同，某些矿物显得表面高一些，某些矿物则显得低平一些，这种现象称为突起(图 4.3.13 及图 4.3.14)。矿物的突起现象仅仅是人们视力的一种感觉，在同一岩石薄片中，各个矿物表面实际上是在同一水平面上。为什么人们会产生突起高低的感觉呢？主要是由于矿物折射率与加拿大树胶折射率不同所引起的。矿物折射率与加拿大树胶折射率相差愈大，矿物的边缘就愈粗，糙面愈明显，因而使矿物显得突起很高。相反的，两者间折射率差值愈小，矿物的边缘就愈细，糙面不明显(表面光滑)，因而使矿物显得突起低。所以矿物的突起高低，实际上是矿物边缘与糙面的综合反映。

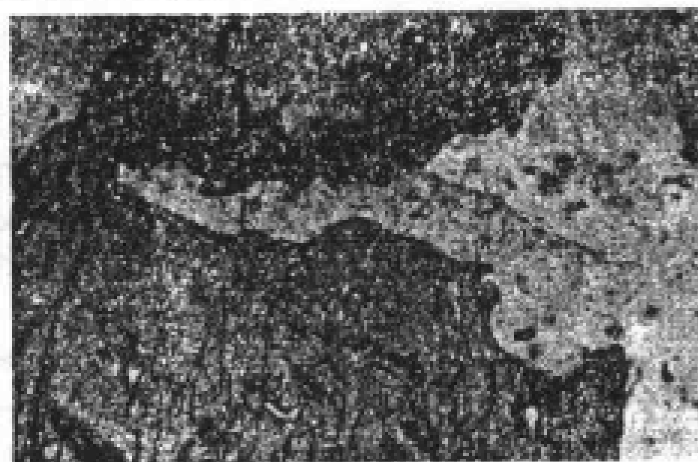
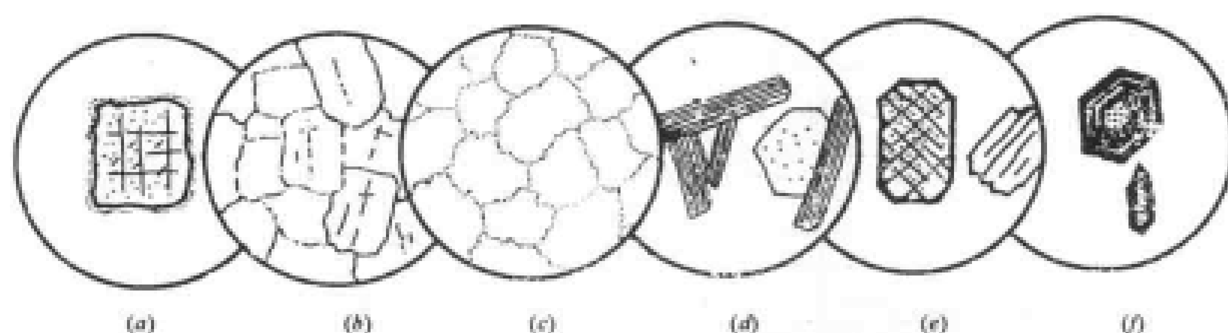


图 4.3.13 薄片中矿物的突起现象



(a)　(b)　(c)　(d)　(e)　(f)

图 4.3.14　突起等级示意图

(a)负高突起;(b)负低突起;(c)正低突起;(d)正中突起;(e)正高突起;(f)正极高突起

加拿大树胶的折射率等于1.54,折射率大于加拿大树胶的矿物属正突起;折射率小于加拿大树胶的矿物属负突起。区别矿物突起的正负,必须借助于贝克线或色散效应。当矿物与加拿大树胶接触时,提升镜筒,贝克线向矿物内移动时属于正突起;贝克线向加拿大树胶移动属于负突起;浅蓝色细线在矿物一边,橙黄色细线在加拿大树胶一边属于正突起;反之,橙黄色细线在矿物一边,浅蓝色细线在树胶一边属于负突起。

根据矿片边缘、糙面的明显程度及突起高低,可以划分为六个等级(如表4.3.1)。

表 4.3.1

突起等级	折射率	糙面及边缘等特征	实　例
负高突起	<1.48	糙面及边缘显著,提升镜筒,贝克线向树胶移动	萤石
负低突起	1.48~1.54	表面光滑,边缘不明显,提升镜筒,贝克线向树胶移动	正长石
正低突起	1.54~1.60	光面光滑,边缘不清楚,提升镜筒,贝克线向矿物移动	石英、中长石
正中突起	1.60~1.66	表面略显粗糙,边缘清楚	透闪石、磷灰石
正高突起	1.66~1.78	糙面显著,边缘明显而且较粗	辉石、十字石
正极高突起	>1.78	糙面显著,边缘很宽	榍石、石榴石

由上表可以看出,矿物的边缘、糙面明显程度以及由此而表现出的突起高低,都是反映矿物折射率与加拿大树胶折射率的差值大小。差值愈大,矿物的边缘与糙面愈明显,则突起愈高。因此,对这些现象应当统一观察和分析,综合用以估计矿物折射率的大致范围。

3.4.4　闪突起

在单偏光镜下旋转载物台,非均质体矿片的边缘、糙面及突起高低发生明显改变的现象称为闪突起。

矿片的边缘、糙面及突起高低取决于矿物折射率与加拿大树胶折射率的差值大小。非均质体矿物的折射率值随光波在晶体中的振动方向不同而改变。当矿片上光率体椭圆的短半径 N_p 与下偏光镜振动方向 PP 平行时(图4.3.15(a)),由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光,进入矿片后,沿 N_p 方向振动,此时矿片的折射率值等于 N_p。当矿片上光率体椭圆半径 N_g 平行 PP 时(图4.3.15(b)),由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光,进入矿片后,沿 N_g 方向振动,此时矿片的折射率值等于 N_g。N_p、N_g 值与加拿大树胶折射率的差值不同,其突起应当有差异。但一般矿物的双折射率不大,突起变化甚微不易看出来。只有当矿物的双折射率很大,而且其中有一个折射率值与树胶折射率相近或者一个方向为正突起另一方向为负突起时,才具明显的闪突起。

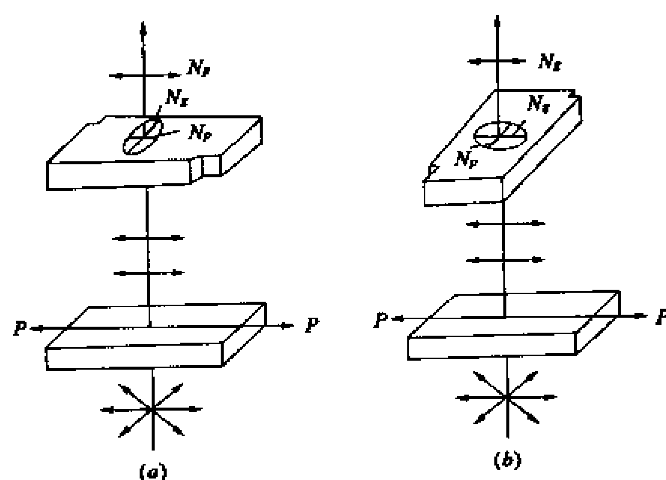


图 4.3.15 闪突起的形成原因

同一矿物切片方向不同,闪突起现象的明显程度也不相同。平行光轴或平行光轴面的切片闪突起现象最明显,垂直光轴的切片不显闪突起,其他方向切片的闪突起明显程度介于二者之间。

4 正交偏光镜间的晶体光学性质

4.1 正交偏光镜的装置及光学特点

所谓正交偏光镜，就是除用下偏光镜之外，再推入上偏光镜，而且使上、下偏光镜的振动方向互相垂直(图4.4.1)。由于所用入射光波是近于平行的光束，因而又可称为平行光下的正交偏光镜。一般以符号"*PP*"代表下偏光镜的振动方向，以符号"*AA*"代表上偏光镜的振动方向。

在正交偏光镜间不放任何矿片时，视域完全黑暗(图4.4.1)。因为自然光波通过下偏光镜之后，即变成振动方向平行 *PP* 的偏光，至上偏光镜时，因与上偏光镜允许透过的振动方向 *AA* 垂直，不能透出上偏光镜，故视域黑暗。

在正交偏光镜间的载物台上放置矿片，则由于矿物性质及切片方向的不同，而显示不同的光学现象。

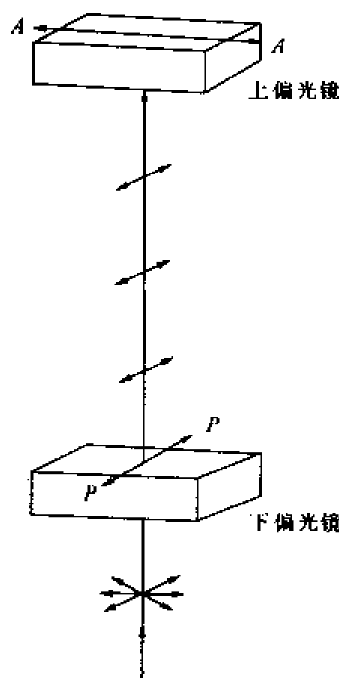


图 4.4.1　正交偏光镜的装置及光学特点

4.2 正交偏光镜间矿片的消光现象及消光位

矿片在正交偏光镜间变黑暗的现象，称为消光现象。矿片为什么变黑暗呢?

在正交偏光镜间，载物台上放置均质体或非均质体垂直光轴的矿片(图4.4.2(*a*))。由于这两种矿片的光率体切面都是圆切面，光波垂直这两种切面入射时，不发生双折射，也不改变入射光波的振动方向。因此，由下偏光镜透出的振动方向平行 *PP* 的偏光，通过矿片后，原来的振动方向没有改变，仍然与上偏光镜的振动方向 *AA* 垂直，不能透出上偏光镜，而使矿片变黑暗(消光)。旋转物台 360°，矿片的消光现象不改变，故称全消光。

在正交偏光镜间，放置非均质体其他方向的矿片(除垂直光轴切片以外)，这类矿片的光率体切面均为椭圆切面。光波垂直这种切片入射时，必然发生双折射，分解形成两种偏光，其振动方向必分别平行光率体椭圆切面长短半径。当矿片上光率体椭圆切面长短半径与上、下偏光镜振动方向(*AA*、*PP*)平行时(图4.4.2(*b*))，由下偏光镜透出的振动方向 *PP* 的偏光进入矿片后，因其振动方向与矿片上光率体椭圆切面半径之一平行，在矿片中沿与 *PP* 平行的半径方向振动，不改变原来的振动方向透出矿片，到达上偏光镜之后，仍与上偏光镜允许通过的振动

方向 AA 垂直，不能透出上偏光镜，故使矿片消光。旋转载物台 360°，矿片上光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向（AA、PP）有 4 次平行的机会，故这类矿片有 4 次消光。

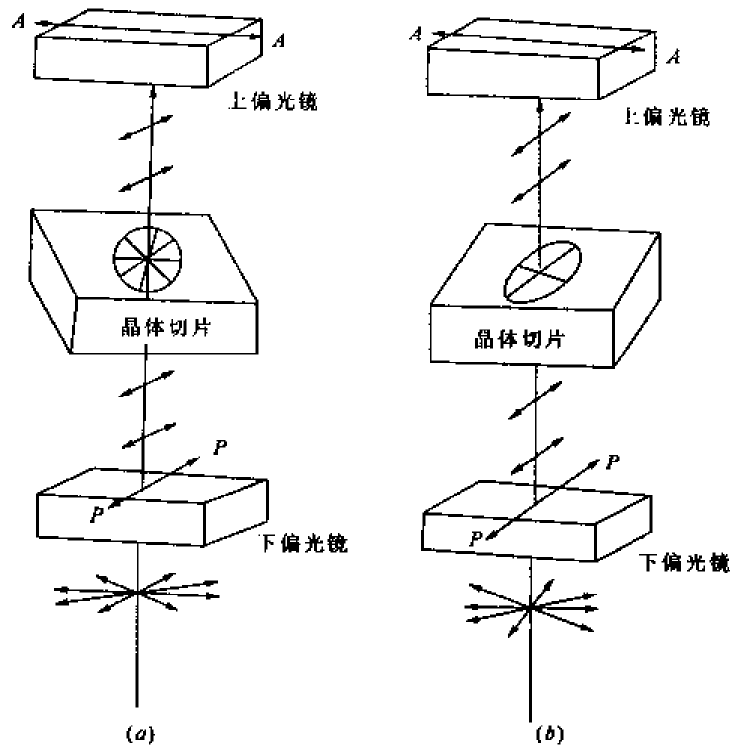


图 4.4.2　矿片在正交偏光镜间的消光现象

非均质体除垂直光轴切片以外的任意方向切片，在正交偏光镜间处于消光时的位置称为消光位。当矿片在消光位时，其光率体椭圆半径必定与上、下偏光镜振动方向（AA、PP）平行。偏光显微镜中的上、下偏光镜振动方向一般是已知的（通常以目镜十字丝方向代表）。根据以上原理，可以确定矿片上光率体椭圆半径的方向。

某些单斜晶系或三斜晶系矿物，由于其光率体色散较强，矿片上紫光光率体椭圆半径与红光光率体椭圆半径的方位不同。因此，紫光与红光的消光位不一致。这种矿片在正交偏光镜下，转动载物台时不出现全黑位置，而是在消光位附近出现暗褐红至暗蓝紫色的变化，它们分别代表紫光与红光的消光位。当矿片上紫光光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向（AA、PP）平行时，紫光消光而呈现暗褐红色。当矿片上红光光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 平行时，红光消光而呈现暗蓝紫色。

非均质体除垂直光轴以外的任意切片，不在消光位时，则发生干涉作用。

4.3　正交偏光镜间矿片的干涉现象

当非均质体矿片上光率体椭圆半径 K_1、K_2 与上、下偏光镜振动方向（AA、PP）斜交时（图 4.4.3），由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，进入矿片后，发生双折射分解形成振动方向平行 K_1、K_2 的两种偏光。K_1、K_2 的折射率不等（$N_{K_1}>N_{K_2}$），它们在矿片中的传播速度不同（K_1 为慢光，K_2 为快光）。K_1、K_2 在透过矿片的过程中，必然产生光程差，以符号 R 表示。当 K_1、K_2 二者在空气中的传播速度相同，因而它们在到达上偏光镜之前，光程差保持不

变。

K_1、K_2 两种偏光的振动方向与上偏光镜振动方向 AA 斜交，故当 K_1、K_2 先后进入上偏光镜时，必然再度发生分解(图 4.4.3(b))，形成 K_1'、K_2'和 K_1''、K_2''四种偏光。其中 K_1''、K_2''的振动方向垂直上偏光镜振动方向 AA，不能透出上偏光镜，可以不考虑。K_1'、K_2'的振动方向平行上偏光镜的振动方向 AA，完全可以透过上偏光镜。透出上偏光镜后的 K_1'、K_2'两种偏光具以下特点：

①K_1'、K_2'由同一偏光束经过两次分解(透过矿片和上偏光镜时)而成，其频率相等。

②K_1'、K_2'之间有固定的光程差(由 K_1、K_2 继承下来的光程差)。

③K_1'、K_2'在同一平面内(平行 AA)振动。

因此，K_1'、K_2'两种偏光具备了光波干涉的条件，必将发生干涉作用。干涉的结果取决于两种偏光之间的光程差 R。

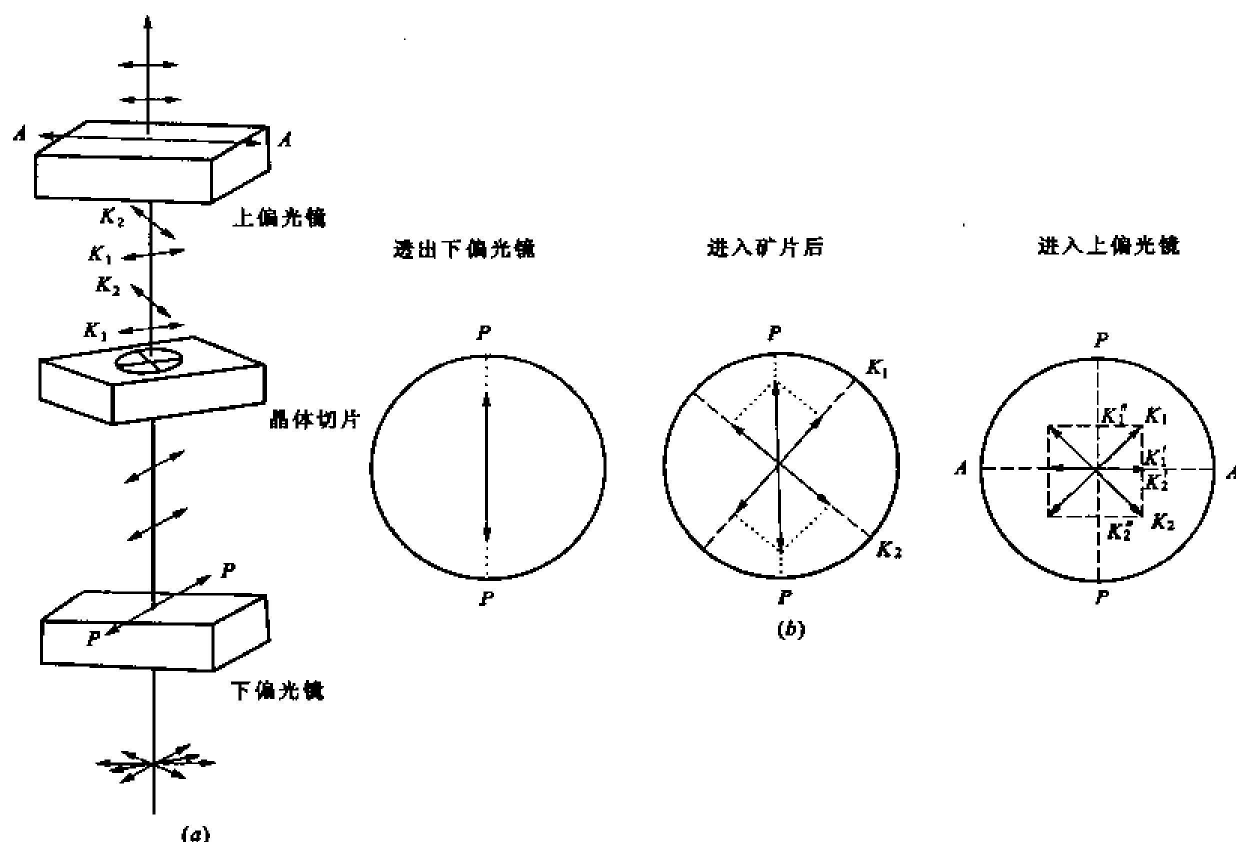


图 4.4.3 矿片上光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 斜交时，光波透过晶体切片的分解情况
(a)立体图；(b)矢量分解平面图

如果光源为单色光，当光程差 $R=2n\frac{\lambda}{2}=n\lambda$(半波长的偶数倍)时，$K_1'$、$K_2'$干涉的结果是相互抵消而变黑暗。当光程差 $R=(2n+1)\frac{\lambda}{2}$(半波长的奇数倍)时，$K_1'$、$K_2'$干涉的结果互相叠加，其亮度加强(最亮)。当光程差 R 介于 $2n\frac{\lambda}{2}$和$(2n+1)\frac{\lambda}{2}$之间时，K_1'、K_2'干涉的结果是其亮度介于黑暗与最亮之间。下面用图 4.4.4 和图 4.4.5 说明 K_1'、K_2'两种偏光的干涉情况(图 4.4.4 为立体图，图 4.4.5 为与图 4.4.4 对应的偏光矢量分解平面图)。

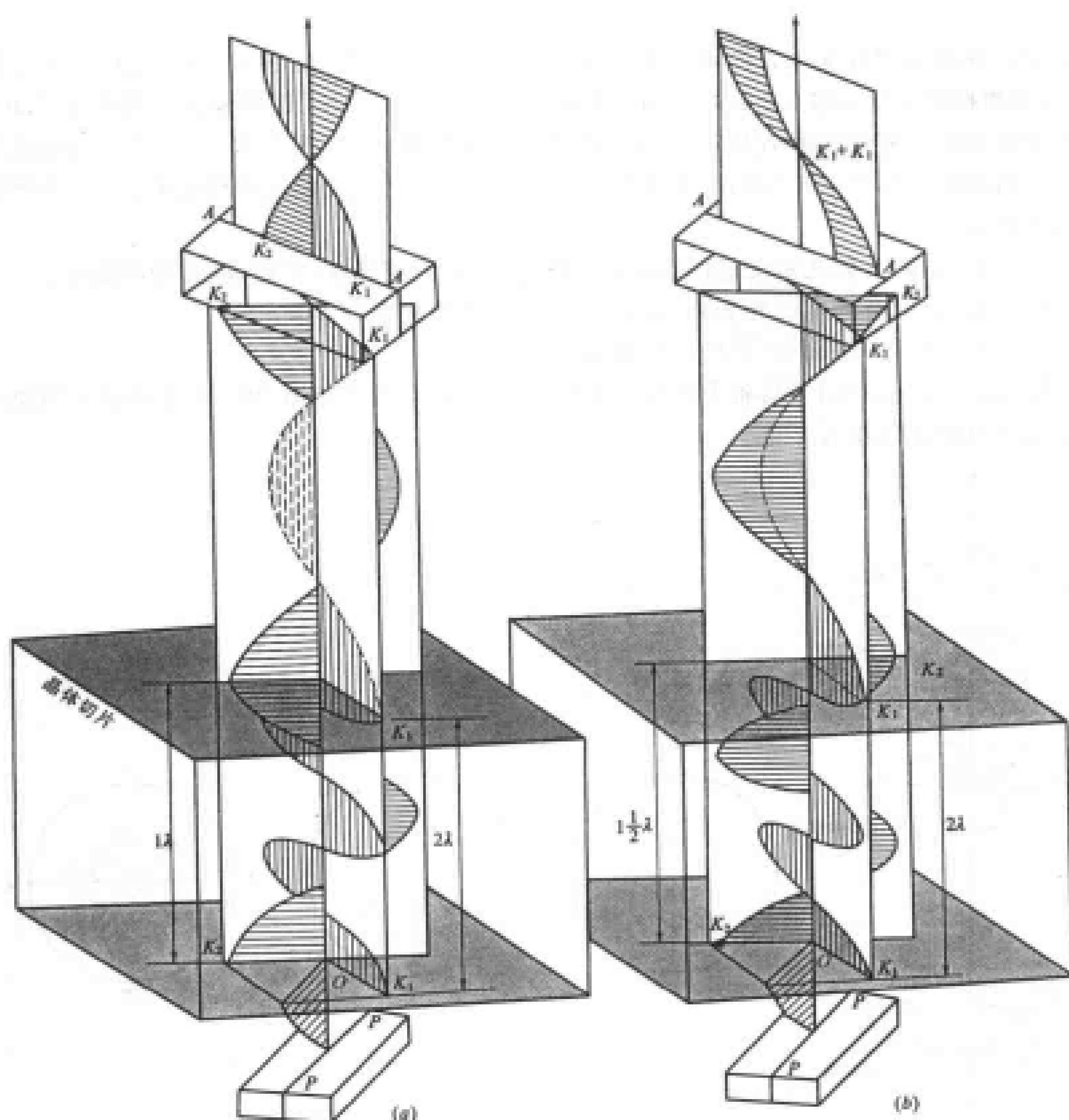


图 4.4.4　单色光波通过正交偏光镜间非均质矿片的干涉情况示意图

图 4.4.4(*a*)及图 4.4.5(*a*)、(*b*)，表示自下偏光镜透出的振动方向平行 *PP* 的单色偏光进入矿片后，分解形成振动方向平行矿片上光率体椭圆半径 K_1、K_2 的两种偏光(图 4.4.4(*a*)中矿片底面的 OK_1、OK_2 及图 4.4.5(*b*)中的 K_1、K_2)。它们的折射率不等($N_{K_1}>N_{K_2}$)，在矿片中的传播速度也不同(K_1 为慢光，K_2 为快光)，这两种偏光在通过矿片过程中产生了一个波光的光程差$\left(\text{相当于 } R=2n\dfrac{\lambda}{2}\right)$，它们先后透出矿片时，在矿片顶部，其振动位相相同(图 4.4.4(*a*)晶体顶面的箭头方位及图 4.4.5(*c*))。这两种偏光进入空气后，传播速度相同，其光程差不变。当它们先后到达上偏光镜时，仍保持原来的位相(见图 4.4.4(*a*)中上偏光镜底面的箭头方位及图 4.4.5(*d*))。由于 K_1、K_2 的振动方向与上偏光镜振动方向(*AA*)斜交，因而再度分解(图 4.4.5(*d*))，形成平行上偏光镜振动方向(*AA*)的 K_1'、K_2'和垂直上偏光镜振动方向

(AA)的 K_1''、K_2''，后者不能透出上偏光镜，故不考虑它(图中未表示出)。K_1'、K_2'两种偏光振幅相等，振动方向相反，干涉的结果是互相抵消而显黑暗。

图 4.4.4(b)及图 4.4.5(e)、(f)表示 K_1、K_2 两种偏光在通过矿片过程中产生了半个波长的光程差$\left(相当于 R=(2n+1)\frac{1}{2}\lambda\right)$，它们先后透出矿片时，在矿片顶部，其位相相反(图 4.4.4(b)晶体顶面的箭头方向及图 4.4.5(e))。进入上偏光镜时，再度分解形成的 K_1'和 K_2'振幅相等，振动方向相同(图 4.4.5(f))，故干涉的结果是互相叠加而亮度加强(最亮)。

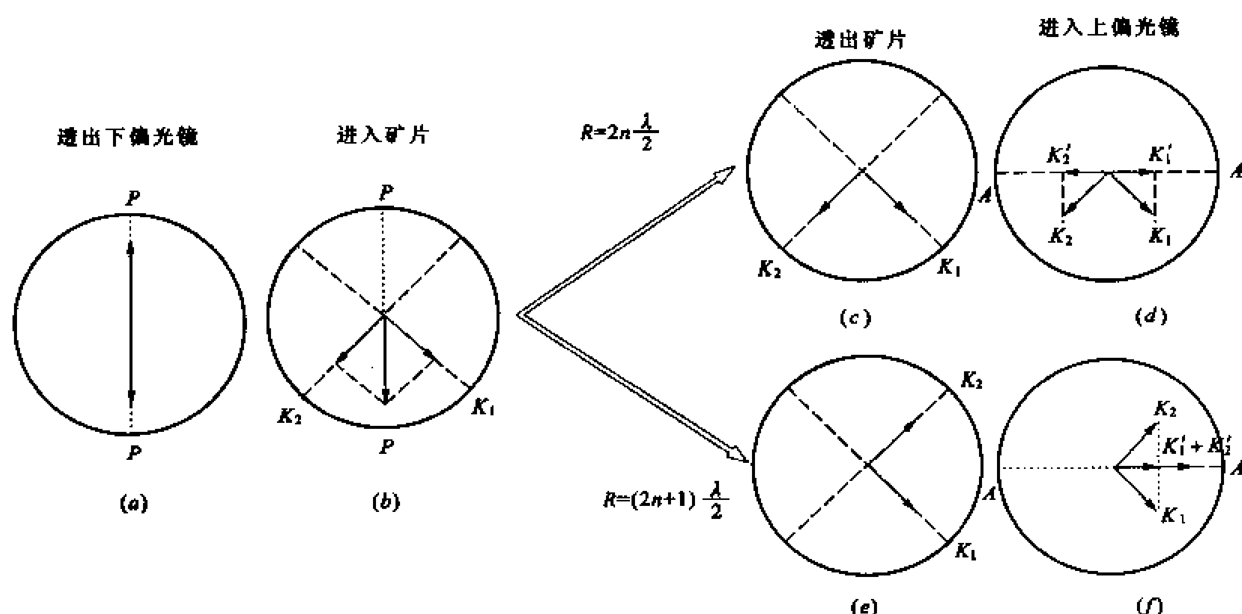


图 4.4.5　非均质体任意方向切片在正交偏光镜间的偏光矢量分解平面图

(入射光垂直纸面，分解矢量只画出一侧)

此外，矿片干涉结果呈现的明亮程度，还与透出上偏光镜的两种偏光 K_1'、K_2'的振幅大小有关，其振幅愈大亮度愈强。通过偏光矢量分解的平面图解可以证明，只有当矿片的光率体椭圆半径(K_1、K_2)与上、下偏光镜的振动方向(AA、PP)成 45°夹角时，K_1'、K_2'振幅最长，矿片最明亮。这时的矿片位置称为 45°位置。

由上可知：光程差对干涉作用结果起着主导作用，故应该进一步了解影响光程差的因素。根据物理学中"光程"及"光程差"的概念可知，K_1、K_2 两种偏光，透过矿片的"光程"应为 $d\cdot N_1$ 和 $d\cdot N_2$(d 为矿片厚度，也是两种偏光透过矿片的几何路程，N_1 为 K_1 的折射率，N_2 为 K_2 的折射率)。此两种偏光的光程差 $R=dN_1-dN_2=d(N_1-N_2)$，即光程差与矿片厚度和双折射率成正比。双折射率又与矿物性质和切片方向有关。因此，影响光程差的因素有：矿物性质、矿物的切片方向和矿片的厚度。这三方面的因素必须联系起来考虑。特别应当清楚地理解到，不同矿物的最大双折射率可以不同；同一矿物，切片方向不同，双折射率也不同，其中平行光轴或光轴面的切面，双折射率最大，垂直光轴切面的双折射率为零，其他方向切面的双折射率介于最大值和零之间。

4.4 干涉色及干涉色色谱表

4.4.1 干涉色及其成因

将石英沿光轴（Z 轴）方向，由薄至厚磨成楔形，称为石英楔。石英的最大双折射率 $N_e - N_o = 0.009$，为固定常数。若将此石英楔由薄端至厚端，慢慢插入正交偏光镜间的试板孔内，则其光程差将随着石英楔厚度的增加而增大。

若用单色光照射时，随着石英楔的推入，视域内将依次出现明暗相间的干涉条带（图 4.4.6）。在光程差 $R = 2n\frac{\lambda}{2}$处，出现黑暗条带；在光程差 $R = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$处，出现该色光的最亮条带；光程差介于上两者之间，其亮度也介于最亮与最暗之间。明亮和黑暗条带之间的距离，取决于所用单色光的波长。红色光波最长，明暗条带间的距离最大；紫色光波最短，明暗条带间的距离最短（图 4.4.7）。

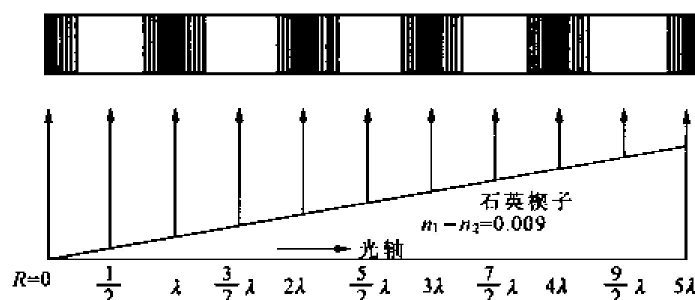


图 4.4.6 用单色光照射石英楔，在正交偏光镜间出现的明暗条带

图 4.4.7 正交偏光镜间不同波长光波透出石英楔干涉所构成的明暗条带

若用白光照射时，由于白光是七种不同波长的单色光所组成，任何一个光程差（除零以外）都不可能同时相当于各色光波半波长的偶数倍$\left(2n\frac{\lambda}{2}\right)$，不可能使它们同时抵消而出现黑暗条带。某一定的光程差，只可能相当或接近于白光中部分色光半波长的偶数倍，而使这部分色光抵消或减弱；同时它又相当或接近于另一部分色光半波长的奇数倍，而使它们不同程度的加强。所有未被抵消的色光混合起来，便构成了与该光程差相应的混合色，它是由于白光干涉的结果，称为干涉色。这种干涉色与单偏光镜下矿片的颜色不同，切不可将两者混淆。

4.4.2 干涉色级序及各级序的特征

当用白光照射时，在正交偏光镜间，随着石英楔的慢慢推入，光程差逐渐增大，视域中出现的干涉色将由低到高出现有规律的变化。这种干涉色的有规律变化，就构成了干涉色级序。

随着光程差由小增大，出现的干涉色有规律变化的大致情况如下：暗灰—灰白—浅黄—橙—紫红—蓝—蓝绿—绿—黄—橙—紫红—蓝绿—绿—黄—橙—红—粉红—浅绿—浅橙—…至亮白色。

根据石英楔干涉色的变化情况，一般将干涉色划分为4～5个级序。

第一级序，主要干涉色为：暗灰—灰白—浅黄—亮黄—橙—紫红。

第二级序，主要干涉色为：蓝—蓝绿—绿—黄—橙—紫红。

第三级序，主要干涉色为：蓝绿—绿—黄—橙—红。

第四级序，主要干涉色为：粉红—浅绿—浅橙。

更高的级序由于色浅而混杂，难于分辨，最后出现高级白干涉色。以上各级干涉色的末端均出现紫红色，由于此紫红色对光程差增减反应灵敏，故称灵视色。

以上各级序干涉色的特征如下：

第一级序干涉色，其光程差为0～550nm。当光程差在100～150nm时，各色光波都不同程度的减弱，呈现暗灰及蓝灰色；当光程差在200～270nm时，接近各色光波的半波长，各色光波均有不同程度的加强，呈现灰白色；当光程差在300nm时，接近黄光的半波长，黄光加强，其他色光也较强，故呈现浅黄色；光程差在300～350nm时，黄光较强，红、橙光也较强，合成亮黄色；光程差在400～450nm时，青光近于抵消，黄、绿、蓝、紫也减弱，仅红、橙光加强，故呈橙色；光程差在500～550nm时，红、紫、青光不同程度的加强，其余色光减弱，合成紫红色。第一级序无蓝色、绿色而有灰色、灰白色。

第二级序干涉色，其光程差为550～1100nm。当光程差在550～650nm时，蓝青、紫光均不同程度的加强，其余色光减弱，故呈较深的蓝色；光程差在650～800nm时，接近于绿光的$1\frac{1}{2}$波长，绿光加强，呈现绿色；光程差在850～950nm时，接近于黄、橙光的$1\frac{1}{2}$波长，呈黄橙色；光程差在1000～1100nm时，接近红光的$1\frac{1}{2}$波长，红光加强，紫光也较强，呈现紫红色。第二级序的干涉色为：蓝、绿、黄、橙、紫红等色的依次出现，色调鲜艳较纯，色带间界线较清楚。

第三级序干涉色，其光程差为1100～1650nm。当光程差在1100～1200nm时，接近蓝光的$2\frac{1}{2}$波长，蓝光最强，绿光次强，故呈蓝绿色。当光程差在1300～1350nm时，接近绿光的

$2\frac{1}{2}$波长，绿光加强，黄光也较强，呈现鲜绿色。当光程差在1450nm左右时，接近黄光的$2\frac{1}{2}$波长，黄光最强，呈黄色。当光程差在1500～1650nm时，橙、红光最强，呈现橙、红色，以上是第三级序，与第二级序干涉色比较，在颜色出现的顺序上是一致的，但其色调较第二级序干涉色浅，干涉色条带之间的界线不如第二级序清楚。

第四级序及更高的干涉色，其光程差更大，干涉色的色调更浅，颜色混杂不纯，干涉色条带间的界线更模糊不清。当光程差增大到相当五级以上的干涉色时，几乎接近于各色光半波长的奇数倍，同时又接近于它们半波长的偶数倍，各色光波都有不等量的出现。互相混杂的结果，形成一种与珍珠表面相似的亮白色，称为高级白干涉色。高级白与一级白干涉色的区别方法是加入试板后高级白干涉色基本无变化。一般情况下，矿片厚度均在0.03mm左右，如矿片呈现高级白干涉色，则说明该矿物具很高的双折射率。

由上可知：干涉色级序的高低，取决于相应的光程差大小，而光程差大小又决定于矿片厚度和双折射率大小，双折射率大小则与矿物性质及切片方向有关。在同一岩石薄片中，各种矿物颗粒的厚度基本相等。同一矿物因切片方向不同，可显示不同的干涉色，平行光轴或平行光轴面的切面，双折射率最大，呈现的干涉色级序最高；垂直光轴的切面双折射率为零，呈全消光；其他方向的切面，双折射率变化于零和最大值之间，其干涉色级序也介于灰黑与最高干涉色之间。不同矿物的最大双折射率不同，它们所显示的最高干涉色不相同。所以在鉴定矿物时，测定它们的最高干涉色才有鉴定意义。

4.4.3 干涉色色谱表

干涉色色谱表是表示干涉色级序、光程差、双折射率及薄片厚度之间关系的图表（图4.4.8）。它是根据光程差公式$R=d(N_1-N_2)$做成的图表。

色谱表的横坐标方向表示光程差的大小，以毫微米为单位；纵坐标方向表示薄片厚度，以毫米(mm)为单位；斜线表示双折射率大小。在各种光程差的位置上，填上相应的干涉色，便构成了干涉色的色谱表。因为光程差、薄片厚度、双折射率三者之间有一定关系，所以在它们之中已知其中任意两个数据，应用色谱表，就可求出第三个数据。例如已知石英的最大双折射率为0.009，显微镜下观察石英的最高干涉色为一级黄色，根据色谱表可知此矿片厚度大约为0.04mm，比标准薄片厚度(0.03mm)稍厚。若石英最高干涉色为一级浅黄色，则矿片接近标准厚度。

4.4.4 异常干涉色

在讨论干涉色的成因时，是以同一矿物对不同波长单色光的双折射率大小相等为基础的，实际上，同一矿物对不同波长单色光的双折射率大小并不都是相等。只有当N_e、N_o或N_g、N_m、N_p的色散曲线平行时（第1章图4.1.17(*a*)及图4.1.18(*a*)、(*b*)），不同单色光的双折射率大小才相等。如果N_e、N_o或N_g、N_m、N_p的色散曲线不平行（图4.1.17(*b*)、(*c*)、(*d*)及图4.1.18(*c*)、(*d*)、(*e*)、(*f*)），则不同波长单色光的双折射率不等，即该矿物具双折射率色散。多数矿物的双折射率色散很小，各单色光的光程差差异不大，对干涉色影响甚微，难于察觉，可忽略不计。少数矿物的双折射率色散较大，可以影响干涉色。因而这部分矿物呈现色谱表上没有的干涉色，称异常干涉色。但双折射率较大的矿物，当其双折射率色散较大时，因各单色光

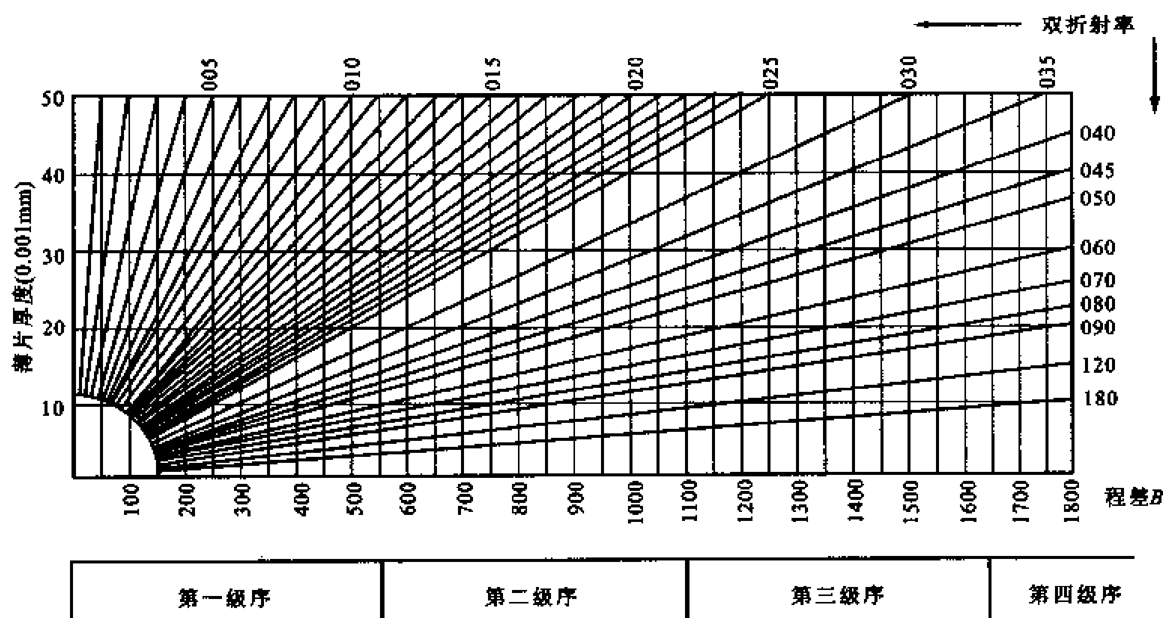


图 4.4.8 干涉色色谱表

的光程差都较大，它们之间光程差的差异所起作用不大，不易显出异常干涉色。只有双折射率低，干涉色接近一级灰的矿物，当其双折射率色散较大时，才能显出异常干涉色。如果矿物对紫光的双折射率显著大于红光的双折射率时(图 4.1.17(*b*)及图 4.1.18(*d*))，呈现“柏林蓝”的异常干涉色(与蓝墨水相似)，如绿泥石、黝帘石等。如果红光的双折射率显著大于紫光的双折射率时(图 4.1.18(*c*))，呈现“锈褐色”的异常干涉色，如绿泥石、符山石等。还有少许矿物，对某一单色光的双折射率为零(图 4.1.17(*d*))，而对其余单色光有不等的双折射率，其结果是形成与该单色光互补色光的异常干涉色，如黄长石，对黄光的双折射率为零，对其他色光有不等的双折射率，则呈现蓝色的异常干涉色。

除异常干涉色之外，某些颜色浓的矿物，如黑云母、角闪石等，其干涉色常易受本身颜色的干扰和掩盖，不易看清其应有的干涉色。

4.4.5 平行偏光镜间的干涉色

使上、下偏光镜的振动方向 AA、PP 互相平行，称为平行偏光镜。

在平行偏光镜间，当载物台上不放置矿片时，由下偏光镜透出的振动方向平行 PP 的偏光，至上偏光镜时，由于上、下偏光镜的振动方向互相平行，可以透出上偏光镜，故视域明亮。

当载物台上放置均质体或非均质体垂直光轴的矿片时，因光透过此种矿片不发生双折射，不改变原有偏光的振动方向，故和载物台不放矿片时的情况相同，矿片仍是明亮的。

当载物台上放置非均质体任意方向(除垂直光轴以外)的矿片时，和正交偏光镜间的情况一样，透过下偏光镜的振动方向平行 PP 的偏光，经过矿片和上偏光镜时，因两度分解而具备了干涉条件，必然要发生干涉作用。但其干涉结果与正交偏光镜间不同(图 4.4.9)，若用单色光照射时，当 $R=2n\dfrac{\lambda}{2}$ 时，透出上偏光镜的两种偏光(K_1'、K_2')，振幅相等，振动方向相同，干涉结果是互相叠加而加强(图 4.4.9(*a*))；当 $R=(2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$ 时，透出上偏光镜的两种偏光，振

幅相等，振动方向相反，干涉结果是互相抵消(图 4.4.9(*b*))。

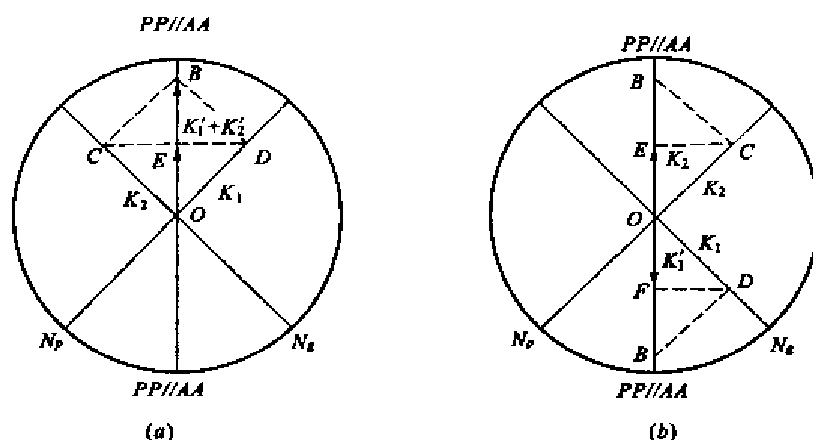


图 4.4.9 平行偏光镜间非均质体任意方向切片的偏光矢量分解平面图

(*a*) $R=2n\frac{\lambda}{2}$；(*b*) $R=(2n+1)\frac{\lambda}{2}$

由上可见：平行偏光镜间，两种偏光波的加强干涉和减弱干涉，与正交偏光镜间在位相上相差$\frac{1}{2}$波长。

如用白光照射时，出现的干涉色是正交偏光镜间呈现干涉色的互补色，例如当光程差为550nm 时，在正交偏光镜间，呈现一级紫红的干涉色，但在平行偏光镜间则呈现黄绿色干涉色。

在岩石薄片鉴定工作中，平行偏光镜间的观察用得较少，仅有时用以区别在正交偏光镜间难于区分的一级灰白与高级白干涉色。正交偏光镜间所呈现的一级灰白干涉色，在平行偏光镜间则变为暗橙红色，而高级白仍为白色。

4.5 补色法则及补色器

在正交偏光镜间，测定一些晶体光学性质时，往往借助于一些补色器(或试板)。应用补色器时，需遵循补色法则。

4.5.1 补色法则

在正交偏光镜间，两个非均质体任意方向的矿片(除垂直光轴以外的)，在 45°位置重叠时，光通过此两矿片后总光程差的增减法则(光程差的增减具体表现为干涉色级序的升降变化)，称为补色法则。

设一非均质体矿片的光率体椭圆半径为 N_{g_1} 与 N_{p_1}，光波射入此矿片后发生双折射，分解形成两种偏光，透出矿片后所产生的光程差为 R_1。另一矿片的光率体椭圆半径为 N_{g_2} 与 N_{p_2}，产生的光程差为 R_2。

将两个矿片重叠于正交偏光镜间，并使两矿片的光率体椭圆半径与上、下偏光镜的振动方向成 45°夹角。光波通过两矿片后，必然产生一个总光程差，以 R 表示。总光程差 R 是加大还是减小，取决于两矿片重叠的方式(即重叠时光率体椭圆半径的相对位置)。

当两矿片的同名半径平行时(即 $N_{g_1} // N_{g_2}$、$N_{p_1} // N_{p_2}$)(图 4.4.10(a)),光透过两矿片后,其总光程差 $R=R_1+R_2$。其中 $R>R_1$、$R>R_2$。由于光程差的增减表现为干涉色级序的升降,因此总光程差 R 反映出的干涉色,比原来两个矿片各自的干涉色级序都高,即同名半径平行时干涉色级序升高(图 4.4.10(a))。

当两矿片的异名半径相平行时(即 $N_{g_1} // N_{p_1}$、$N_{p_2} // N_{g_2}$)(图 4.4.10(b)),光透过两矿片后,总光程差 $R=R_1-R_2$ 或 $R=R_2-R_1$。它们可能有三种关系:$R<R_1, R<R_2$;$R>R_1, R<R_2$;$R<R_1, R>R_2$。因此总光程差 R 所反映出的干涉色,比原来两个矿片的干涉色级序都低,或比其中某一矿片的干涉色级序低,即当异名半径平行时,干涉色级序降低(比原来干涉色高的矿片降低)。

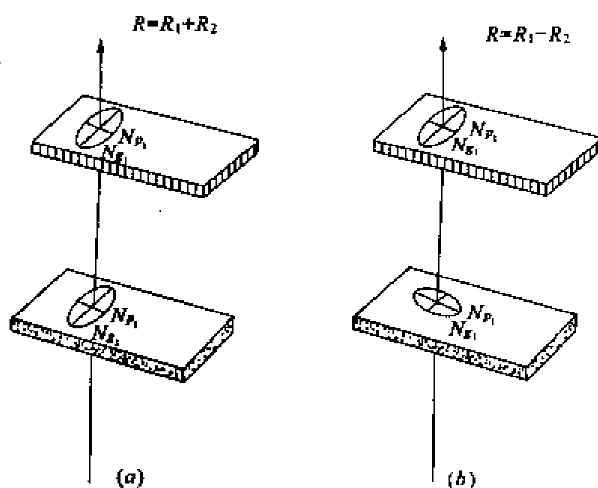


图 4.4.10　补色法则示意图

(a)同名半径相平行;(b)异名半径相平行

由上可知:两矿片在正交偏光镜间 45°位置重叠时,当其光率体椭圆半径的同名半径平行时,总光程差 R 等于原来两矿片的光程差之和,表现为干涉色级序升高;异名半径平行时,总光程差 R 等于原来两矿片光程差之差,其干涉色降低(比原来干涉色高的矿片降低,比原来干涉色低的矿片不一定降低),若 $R_1=R_2$,则总光程差 $R=0$,此时矿片消色而变黑暗。

在两个矿片中,如果一个矿片的光率体椭圆半径名称及光程差为已知,则可根据补色法则,测定另一矿片的光率体椭圆半径名称及光程差。

偏光显微镜里所附的补色器,就是已知光率体椭圆半径名称及光程差的矿片。

4.5.2　几种常用的补色器

1. 石膏试板(图 4.4.11(a)、(b))

光程差约为 550nm,在正交偏光镜间呈现一级紫红干涉色。N_g、N_p 的方向一般都注明在试板上。在矿片上,加入石膏试板,可以使矿片的光程差增加或减少 550nm 左右,使矿片的干涉色整整升高或降低一个级序。如矿片干涉色为二级黄色,加入石膏试板后,升高变为三级黄,降低变为一级黄。一级黄与三级黄不易辨别,在此情况下则不易判断干涉色级序的升降。所以这种试板比较适用于干涉色较低的矿片(二级黄以下的干涉色)。如果矿片干涉色为一级灰($R=150$nm 左右),加入石膏试板后,当同名半径平行时,总光程差 $R=550+150=700$nm,矿片干涉色由一级灰变为二级蓝绿;当异名半径平行时,总光程差 $R=550-150=400$nm,矿片干涉色由一级灰变为一级橙黄。这两种干涉色(二级蓝绿与一级橙黄)对矿片所具的干涉色(一级灰)来说,都是升高,但对石膏试板所具有的干涉色(一级紫红)来说,则有升有降。因此,在这种情况下,判断干涉色级序的升降,应当以石膏试板的干涉色为准。或者记住,当矿片干涉色为一级灰时,加入石膏试板后,干涉色升高时矿片干涉色变为二级蓝,降低时矿片干涉色变为一级黄。

2. 云母试板(图 4.4.11(c)、(d))

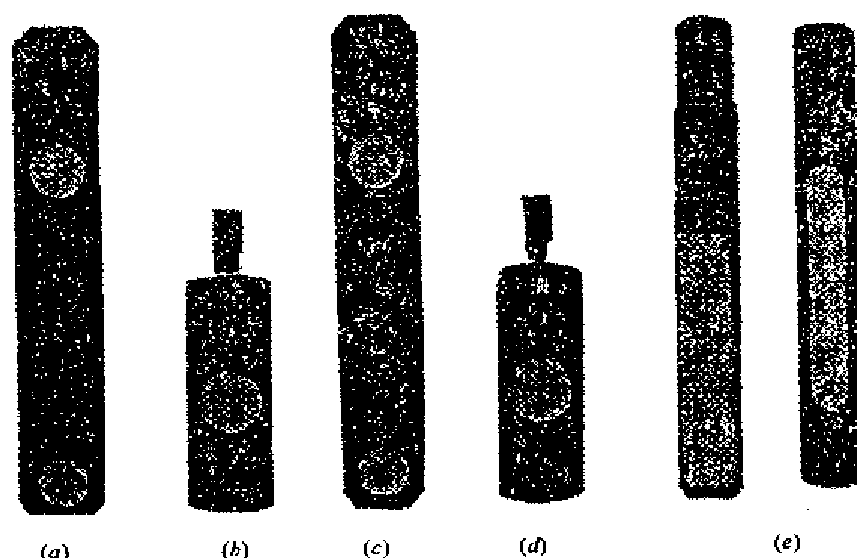


图 4.4.11 石膏试板、云母试板、石英楔

光程差约为黄光波长的四分之一$\left(\frac{1}{4}\lambda\right)$，即 147nm 左右，在正交偏光镜间呈现一级灰白干涉色。其光率体椭圆半径 N_g、N_p 的方向一般都注明在试板上。在矿片上加入云母试板后，使矿片的干涉色级序按色谱表顺序升降大约一个色序。如矿片干涉色为一级紫红，加入云母试板后，升高变为二级蓝，降低变为一级橙黄。这种试板比较适用于干涉色较高的矿片。

3. 石英楔(图 4.4.11(*e*))

沿石英平行光轴方向从薄至厚磨成一个楔形，用加拿大树胶粘在两块玻璃片之间，称为石英楔。其光程差一般是从 0→1680nm 左右，在正交偏光镜间，由薄至厚可以依次产生一级至三级的干涉色。在矿片上由薄至厚插入石英楔，当同名半径平行时，矿片干涉色级序逐渐升高；异名半径平行时，矿片干涉色逐渐降低，当插至石英楔光程差与矿片光程差相等处，矿片消色而出现黑带。

4.6 正交偏光镜间主要光学性质的观察与测定

4.6.1 非均质体矿片上光率体椭圆半径方向和名称的测定

显微镜下研究矿物的许多光学性质，都需要在正交偏光镜间测定矿物光率体椭圆半径的方向和名称。

其测定方法如下：

①将欲测矿片置于视域中心，转动载物台使矿片消光(图 4.4.12(*a*))，此时矿片上光率体椭圆半径的方向分别平行于上、下偏光镜的振动方向(即目镜十字丝的方向)。

②再转载物台 45°，此时矿片上光率体椭圆半径与目镜十字丝成 45°夹角(图 4.4.12(*b*))，矿片干涉色最亮。

③从试板孔插入试板，观察矿片干涉色变化。如果干涉色降低，说明试板与矿片异名半径平行(图 4.4.12(*c*))；如果干涉色升高，说明同名半径平行(图 4.4.12(*d*))。试板上光率体椭

圆半径名称是已知的，据此即可确定矿片上光率体椭圆半径的名称。

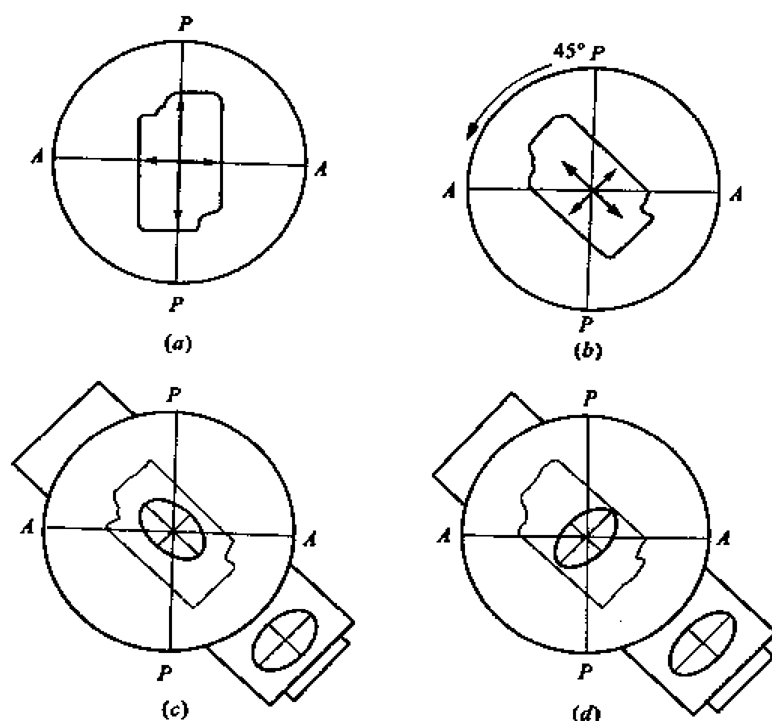


图 4.4.12 非均质体矿片上，光率体椭圆半径方向和名称

(a)消光位；(b)转动载物台 45°；(c)加入试板干涉色降低；(d)加入试板干涉色升高

在实际操作中，根据矿片干涉色级序的高低不同，使用不同的试板。如果干涉色在二级黄以上，最好使用云母试板。

测出的光率体椭圆长短半径，是否为光率体主轴，决定于切片方向。若矿片是平行主轴面，则测出的光率体椭圆长短半径为 N_e 与 N_o（一轴晶），或 N_g、N_m、N_p 中之任意二主轴（二轴晶）。若矿片不平行主轴面，则光率体椭圆半径为 N_e' 与 N_o（一轴晶），或 N_g'、N_p'（二轴晶）。切片方向如何确定将在第 5 章中介绍。

4.6.2 干涉色级序的观察和测定

根据光程差 $R=d(N_1-N_2)$，已知在正常厚度（0.03mm 左右）的岩石薄片中，同一矿物因切片方向不同，双折射率（N_1-N_2）值的大小不同，呈现的干涉色级序高低也不同。因此观察和测定干涉色级序时，必须选择干涉色最高的颗粒。一般鉴定时采用统计方法，多测几个颗粒，取其中最高的。精确测定则必须选择平行光轴或平行光轴面的颗粒，这种颗粒要在锥光下检查确定。

干涉色级序的观察和测定方法有两种：

1. 楔形边法

利用矿物楔形边缘的干涉色色圈，判断矿物的干涉色级序，是比较简便的方法。在岩石薄片中，矿物颗粒往往具有楔形边缘，其边缘较薄，向中央逐渐加厚，因而矿片的干涉色级序也是边缘较低，向中央逐渐升高（图 4.4.13）。如最外圈为一级灰白，向中央干涉色逐渐升高而构成细小的干涉色色圈或不连续的干涉色细条带。其中经过一条红带，则矿片干涉色为二级；经过 n 条红带，矿片干涉色为($n+1$)级。如果矿片边缘最外圈不是从一级灰白开始，则不能应用

这种方法判断干涉色级序。

2. 利用石英楔测定干涉色级序

(1)将选定的矿片(干涉色最高,平行光轴或光轴面的切面)置于视域中心,旋转载物台,使矿物消光。

(2)再转载物台 45°,使矿片上光率体椭圆半径与目镜十字丝成 45°夹角,观察干涉色,此时矿片上干涉色最亮。

(3)从试板孔慢慢插入石英楔,观察矿片干涉色的变化,可能出现下列两种情况:

①随着石英楔的插入,矿片上干涉色逐渐升高,证明石英楔与矿片上光率体椭圆切面同名半径平行,必须旋转载物台 90°,使异名半径平行,再进行测定。

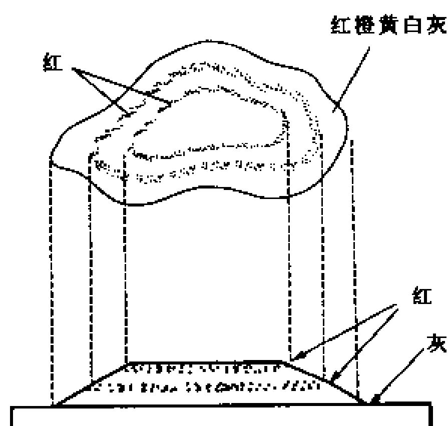


图 4.4.13 矿物楔形边缘的干涉色色圈

②随着石英楔的慢慢插入,矿片的干涉色逐渐降低,说明石英楔与矿片上光率体椭圆切面异名半径平行。当石英楔插入到与矿片光程差相等处,矿片消色而黑暗(往往不是全黑,而是暗灰或混有矿物本身颜色)。再慢慢抽出石英楔,矿片上干涉色又逐渐升高,至石英楔全部抽出时,矿片显示原来的干涉色。在抽出石英楔的过程中,注意观察矿片上干涉色的变化,如果其间经过一次红色,则矿片干涉色为二级,经过 n 次红色,矿片干涉色为 $(n+1)$ 级。若一次观察不清楚可反复操作。

应用贝瑞克消色器测定干涉色级序的方法、原理与石英楔测定法基本相同。

4.6.3 双折射率的测定

同一矿物切片方向不同,双折射率大小不同,显然只有测定最大双折射率才有鉴定意义。所以测定矿物的双折射率,必须在平行光轴(一轴晶)或平行光轴面(二轴晶)的切面上进行。这两种切片的特征是:在正交偏光镜间干涉色最高,锥光下显示平行光轴或平行光轴面的干涉图(其图像特征在第 5 章中介绍)。

根据光程差公式 $R=d(N_1-N_2)$,测出薄片厚度及光程差后,即能确定双折射率值。

1. 光程差的测定方法

(1)利用石英楔测定干涉色级序(方法同上),在干涉色色谱表上求出相应的光程差。因色谱表上每一种干涉色都占有一定的宽度,所以求出的光程差误差在 20～40nm 之间。

(2)利用贝瑞克补色器测定光程差

①将选择的定向切片置于视域中心,旋转载物台使矿片消光。再转载物台 45°,使矿片上光率体椭圆半径与目镜十字丝成 45°夹角。

②从试板孔插入贝瑞克补色器(必须使游标 0°对准刻度轮 30°),转动鼓形轮,观察矿片干涉色变化。若干涉色逐渐升高,必须旋转载物台 90°后,再进行测定;若干涉色逐渐降低,则转至矿片消色为止,记下鼓形轮上读数 a。

③向反方向转动鼓形轮,使矿片出现另一次消色位置,记下鼓形轮读数 b。取正反两次转角的平均值即得补色器的转角 i

$$i=\frac{a-b}{2} \text{或} i=\frac{b-a}{2}$$

④将转角 i 代入 $\lg R=\lg c+\lg(i)-10$ 或 $R=\frac{c}{10000}\{f(i)\cdot 10000\}$ 中，即可求出矿片的光程差。一般误差为 2～3nm。

2. 薄片厚度的测定方法

一般岩石薄片厚度约为 0.03mm，如果双折射率值精确度要求不高，薄片厚度可直接利用 0.03mm。如果测定要求精确度较高，薄片厚度可利用已知矿物测定，最常用的已知矿物有长石和石英。

石英最大双折射率为 0.009，在薄片中选一个石英平行光轴切面(干涉色一级灰白至浅黄)，在锥光镜下检查是否平行光轴的切面。根据干涉色级序或贝瑞克补色器测定其光程差。利用所测的光程差及最大双折射率即可求出薄片厚度$\left(d=\frac{R}{N_1-N_2}\right)$。

斜长石的双折射率随长石成分不同而有差别，不同成分斜长石的双折射率可从《费德洛夫法简明教程》(池际尚编著)94 页及 95 页的图表中查得。

3. 根据所求得的薄片厚度及光程差求双折射率

①根据所测定的薄片厚度及光程差，在干涉色色谱表上查双折射率。

②根据 $R=d(N_1-N_2)$ 计算双折射率。

4.6.4 消光类型与消光角的测定

1. 消光类型

前面已经讲过，当矿片上光率体椭圆半径与上、下偏光镜的振动方向平行时，矿片消光。一般以目镜十字丝代表上、下偏光镜的振动方向。因此，当矿片处于消光位时，目镜十字丝可代表矿片上光率体椭圆半径的方向。矿片上的解理缝、双晶缝、晶体轮廓等又与结晶轴有一定的关系。故非均质体矿片的消光类型是根据矿片消光时，其解理缝、双晶缝、晶体轮廓等与目镜十字丝的关系进行划分的。

可分为下列三种类型：

①平行消光(图 4.4.14(a))：矿片消光时，解理缝、双晶缝或晶体轮廓与目镜十字丝之一平行。

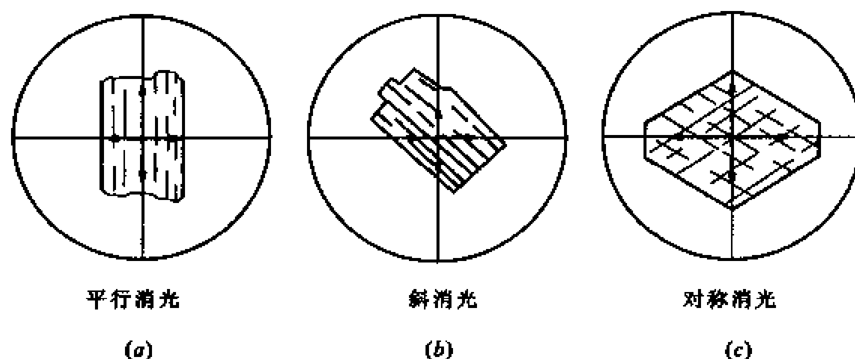


图 4.4.14　消光类型

②对称消光(图 4.4.14(c))：矿片消光时，目镜十字丝为两组解理缝或两个晶面迹线夹角

的平分线。如角闪石垂直两组解理的切面。

③斜消光(图 4.4.14(b)):矿片消光时,解理缝、双晶缝或晶体轮廓与目镜十字丝斜交。此时,光率体椭圆半径与解理缝或双晶缝之间的夹角称消光角。具体表现为矿片消光时,目镜十字丝与解理缝、双晶缝之间的夹角。

矿片的消光类型,取决于矿物的光性方位及切片方向。不同晶系的矿物所具有的消光类型,大致有一定的规律。

中级晶族矿物的 Z 轴与光率体的光轴平行,大多数切面为平行消光和对称消光,斜消光的切面很少见。

斜方晶系矿物的光性方位是三个结晶轴与光率体的三主轴平行。因此,在[100]、[010]、[001]三个晶带(其晶带轴分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴)中的所有切面都是平行消光或对称消光。但与三个结晶轴都斜交且斜交角度较大的任意切面上,可能出现斜消光,其消光角大多数较小,少数可达 40°左右,这种切面上的解理缝或晶面迹线不代表晶体的结晶轴方向。具轴面解理的晶体常比具柱面解理的晶体平行消光的切面多一些,而消光角一般不太大。

单斜晶系矿物的光性方位是其结晶轴 Y 轴与光率体三主轴(N_g、N_m、N_p)中的一个主轴平行,其余两个主轴与结晶轴 X 轴、Z 轴斜交。这类矿物不同方向切面的消光类型可能有下列四种情况。

①在[100]晶带(晶带轴为 X 轴)中。在平行(001)的切面上是对称消光(图 4.4.15(c))。在平行(011)、(0k1)切面上可能出现两组斜交的解理缝,但不一定都是对称消光,有时还可能平行某一组解理消光。{010}是[100]与[001]两个晶带共有的。

②在[001]晶带中(晶带轴为 Z 轴)。平行(010)的切面上(图 4.4.15),包含 Z 晶轴和 X 晶轴,对于角闪石和辉石类 $N_m=Y$ 晶轴的矿物来说,(010)平行光轴面,这种切面包含 N_g 和 N_p 轴。其柱面解理缝方向代表 Z 轴方向,在这种切面上能测得 N_g 与 Z 晶轴的真实夹角。平行(100)的切面(图 4.4.15(d))为平行消光(解理缝一般看不见,只能以晶面迹线判断)。平行(110)的切面(图 4.4.15(e))为斜消光,但其消光角比平行(010)切面小,且其光率体椭圆半径不是主轴而是 N_g'、N_p'。在这个晶带中的其他方向切面均为斜消光,其消光角大小递变于(100)切面的零度与(010)切面的消光角之间。

③在[010]晶带中(晶带轴为 Y 轴)。平行(001)的切面是对称消光,平行(100)的切面是平行消光,其他切面为对称消光或平行消光。

④斜交三个结晶轴的任意方向切面,均为斜消光,消光角的大小,多数比平行(010)切面上的消光角小,有少数消光角比平行(010)切面上的消光角大。这类任意切面上的解理缝方向不能代表 Z 轴方向(即与 Z 轴不一致),光率体椭圆长短半径也不是主轴,而是 N_g'、N_p'。因而测得的消光角不是 N_g 与 Z 轴的真实夹角。

由上可知,单斜晶系矿物不同方向切面的消光类型是变化的,各种消光类型都有,但以斜消光的切面为主。在斜消光的切面中,消光角的大小随切面方向不同而有变化,其中平行(010)切面的消光角才是光率体主轴与结晶轴间的真正夹角(对于角闪石来说,才是 N_g 轴与结晶轴 Z 轴的真正夹角),它是平行 Z 轴切面中(即[001]晶带中),消光角最大的切面。对于辉石和角闪石,(010)平行光轴面,这种切面在正交偏光镜间干涉色最高,切面上角闪石的(110)解理缝不太清楚,辉石的(110)解理缝则很不清楚。

三斜晶系矿物的光性方位是三个结晶轴与光率体三主轴(N_g、N_m、N_p)都斜交,因此,不论

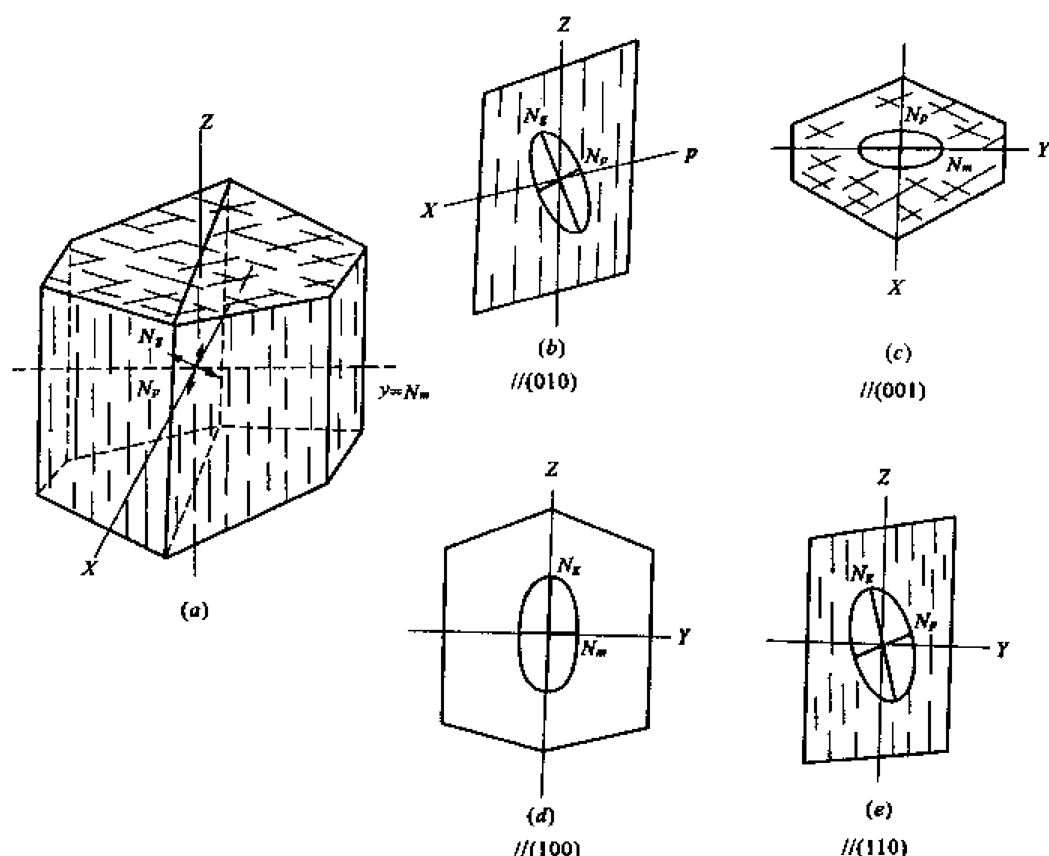


图 4.4.15 普通角闪石不同方向切面的消光类型

是哪一个晶带上的切面或任意切面，绝大多数是斜消光。其消光角大小随切面方向而异，一般是选择某些特殊方向切面用来测定消光角。如斜长石，经常选择垂直(010)的切面，或者同时垂直(010)和(001)的切面测定消光角。

2. 消光角的测定

消光角一般是以结晶轴或晶面符号与光率体椭圆半径之间的夹角表示，如角闪石在(010)切面上的消光角表示为：$N_g \wedge Z=30°$；中性斜长石在垂直(010)切面上的消光角以 $N_p' \wedge (010)=25°$表示。

不是所有各晶系矿物都要测定消光角，一轴晶及斜方晶系的矿物中，斜消光切面不多见，也不是鉴定特征，一般不测定消光角。单斜晶系及三斜晶系矿物，以斜消光切面为主，不同矿物的消光角不同，因此测定消光角具有鉴定意义，单斜晶系矿物一般选择平行(010)的切面。常见的单斜辉石、单斜角闪石的(010)平行光轴面，所以通常选择干涉色最高的切面。三斜晶系矿物一般是选择某些特殊方向切面测定其消光角。

具体测定步骤：

①根据上述原则，选择合适的定向切面。

②将选定的矿片置于视域中心，并使解理缝或双晶缝与目镜十字丝的纵丝平行(图4.4.16(*a*))，记下载物台刻度数。

③旋转载物台使矿片达消光位，此时矿片上光率体椭圆半径与目镜十字丝一致(图4.4.16(*b*))，记录载物台的刻度数。两次读数的差值即该矿片的消光角大小(代表矿片上光率

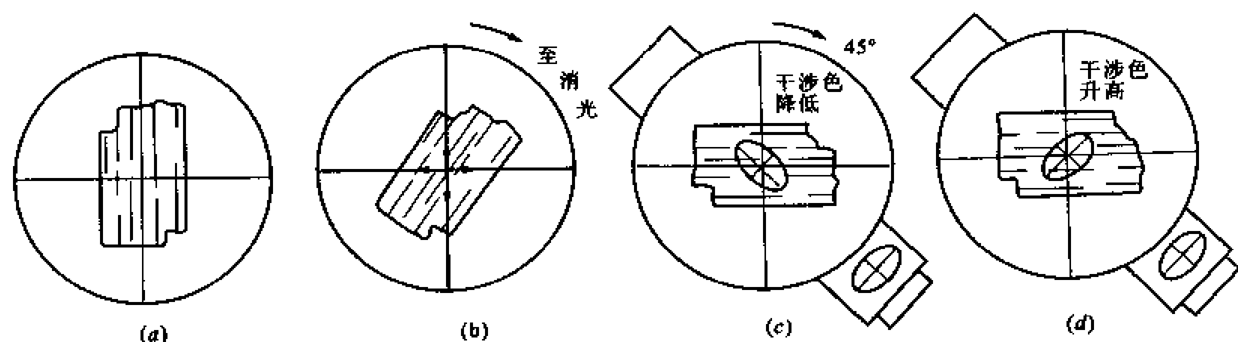


图 4.4.16 消光角的测定步骤

体椭圆半径之一与解理缝或双晶缝的夹角)。

由于矿物切面的消光常有一定的范围,因此,要尽可能准确地判断消光位。可用手扶住载物台,在矿物消光的范围内,小幅度地慢慢往复转动载物台,转动幅度愈来愈小,到最黑暗的位置才停下来。

④从消光位再转载物台 45°,使矿片上光率体椭圆半径与目镜十字丝成 45°夹角(图 4.4.16(*c*)),插入试板,根据矿片干涉色级序的升降变化,确定所测光率体椭圆半径的名称(图 4.4.16(*c*)、(*d*))。如果所用切面是平行光轴面的切面,则其长、短半径分别为 N_g、N_p;如果所用切面不是平行主轴面的,则长半径为 N_g',短半径为 N_p'。

⑤根据解理、双晶的性质,判断其所代表的结晶方向。例如单斜辉石、单斜角闪石的解理面平行(110),则在平行 Z 轴的切面上,解理缝可代表 Z 轴的方向。斜长石垂直(010)的切面上,平行(010)的解理缝、双晶缝不能代表结晶轴的方向,只能代表(010)晶面的方向。

⑥记录方式:如普通辉石平行(010)面上的消光角可写为 $N_g \wedge Z = 48°$(因(010)面 // A_p);斜长石垂直(010)切面上的消光角可写为 $N_p' \wedge (010) = 20°$(该切面不平行主轴面)。

4.6.5 晶体延性符号的测定

长条状的矿物切面,其延长方向与光率体椭圆切面长半径(N_g 或 N_g')平行或其夹角小于 45°时,称正延性;延长方向与光率体椭圆切面的短半径(N_p 或 N_p')平行或其夹角小于 45°时,称负延性。延性符号是某些长条状矿物的鉴定特征(图 4.4.17)。

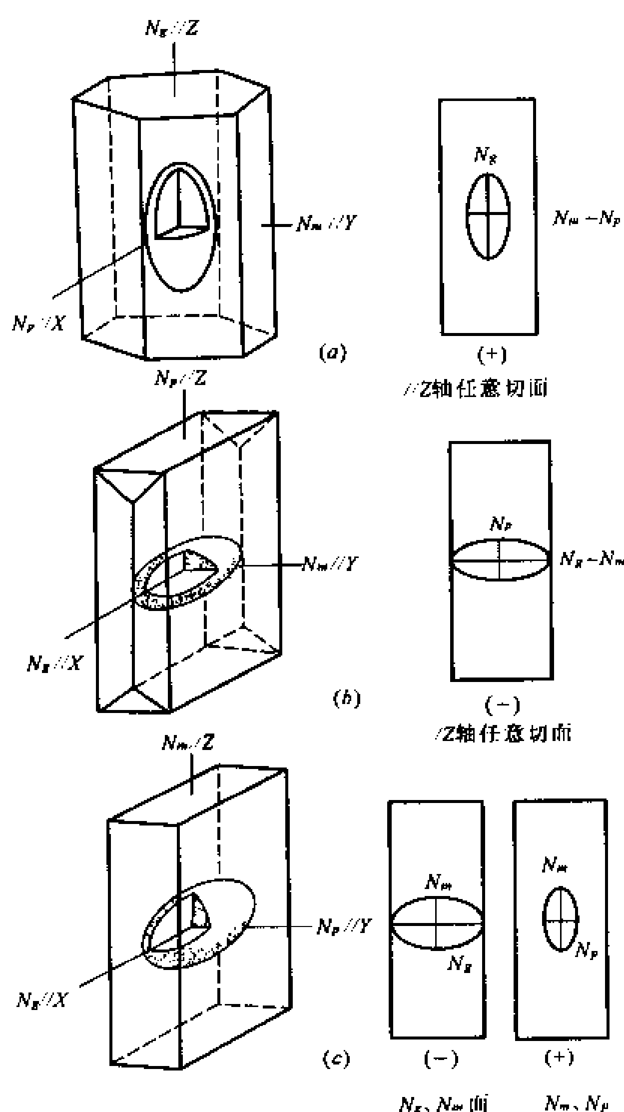


图 4.4.17 晶体延性的类型

对于斜消光的矿片，只要测定了消光角就能判断延性符号。对于平行消光的矿物延性符号的测定方法如下(图 4.4.18)。

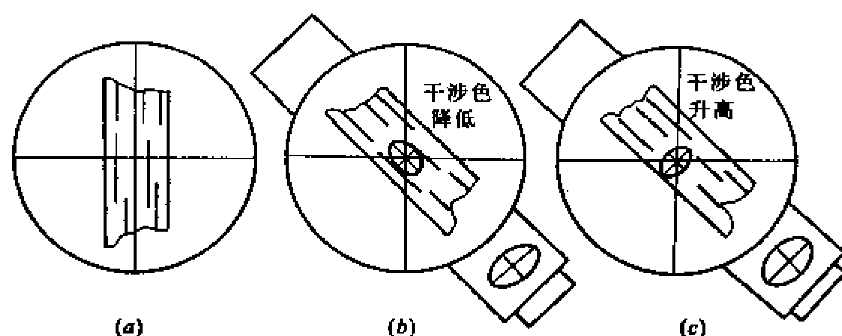


图 4.4.18　延性符号的测定步骤

(a)消光位；(b)正延性；(c)负延性

①把欲测定的矿片置于视域中心，使晶体延长方向平行目镜十字丝的纵丝(图 4.4.18(a))，此时矿片消光(因系平行消光)。

②旋转载物台 45°，使延长方向与目镜十字丝成 45°夹角(图 4.4.18(b))，插入试板，根据矿片干涉色升降变化，即可确定延性符号(图 4.4.18(b)、(c))。

当矿物晶体延长方向与 N_m 平行时，则矿片的延性可正可负(图 4.4.17(c))。如果长条状矿物的消光角为 45°时，则延性正负不分。

4.6.6　双晶的观察

矿物的双晶在正交偏光镜间，表现为相邻两单体不同时消光，呈现一明一暗的现象，这是由于构成双晶的两个单体中，一个单体绕另一个单体旋转了 180°，而使两个单体的光率体椭圆半径方位不同(图 4.4.19(a))。双晶两个单体间的结合面称双晶结合面。双晶结合面与薄片平面的交线称双晶缝，一般较平直。当双晶结合面与薄片平面的法线一致时，双晶缝细而清楚；当双晶结合面与薄片平面的法线间夹角增大时，双晶缝逐渐变得宽而模糊。由于双晶结合面相当于两单体间的一个对称面，当结合面与薄片法线一致时，相邻两单体的光率体切面在双晶缝两侧是对称的，故当双晶缝与目镜十字丝平行或成 45°夹角时，双晶缝两侧的单体明亮程度一致，此时看不见双晶(图 4.4.19(b))。

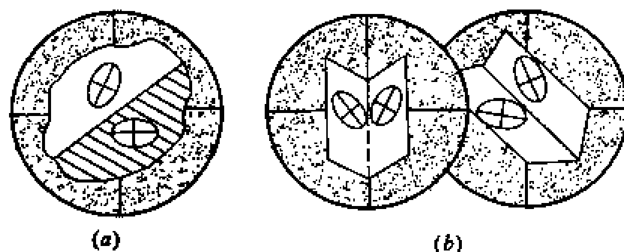


图 4.4.19

(a)双晶在正交偏光镜间的消光情况；

(b)双晶两单体上光率体椭圆切面与目镜十字丝间的关系

根据双晶单体的数目，可以分为下列双晶类型：

(1)简单双晶(图 4.4.20(a)、(b))：仅由两个双晶单体组成。在正交偏光镜间，表现为一个单体消光，而另一个单体明亮，旋转载物台，两个双晶单体明暗相互更换。

(2)复式双晶：由两个以上的双晶单体组成。根据双晶结合面的关系可分为：

①聚片双晶　双晶结合面彼此平行，在正交偏光镜间呈聚片状(图 4.4.20(c))，旋转载物

台，奇数与偶数两组双晶单体轮换消光，而呈明暗相间的细条带。如斜长石的钠长石双晶。

②联合双晶　双晶结合面之间不平行，按照双晶单体的数目不同，可分为三连晶、四连晶和六连晶(图 4.4.20(*d*))。此外还有特殊的双晶类型，如微斜长石的格子状双晶(图 4.4.20(*e*))。

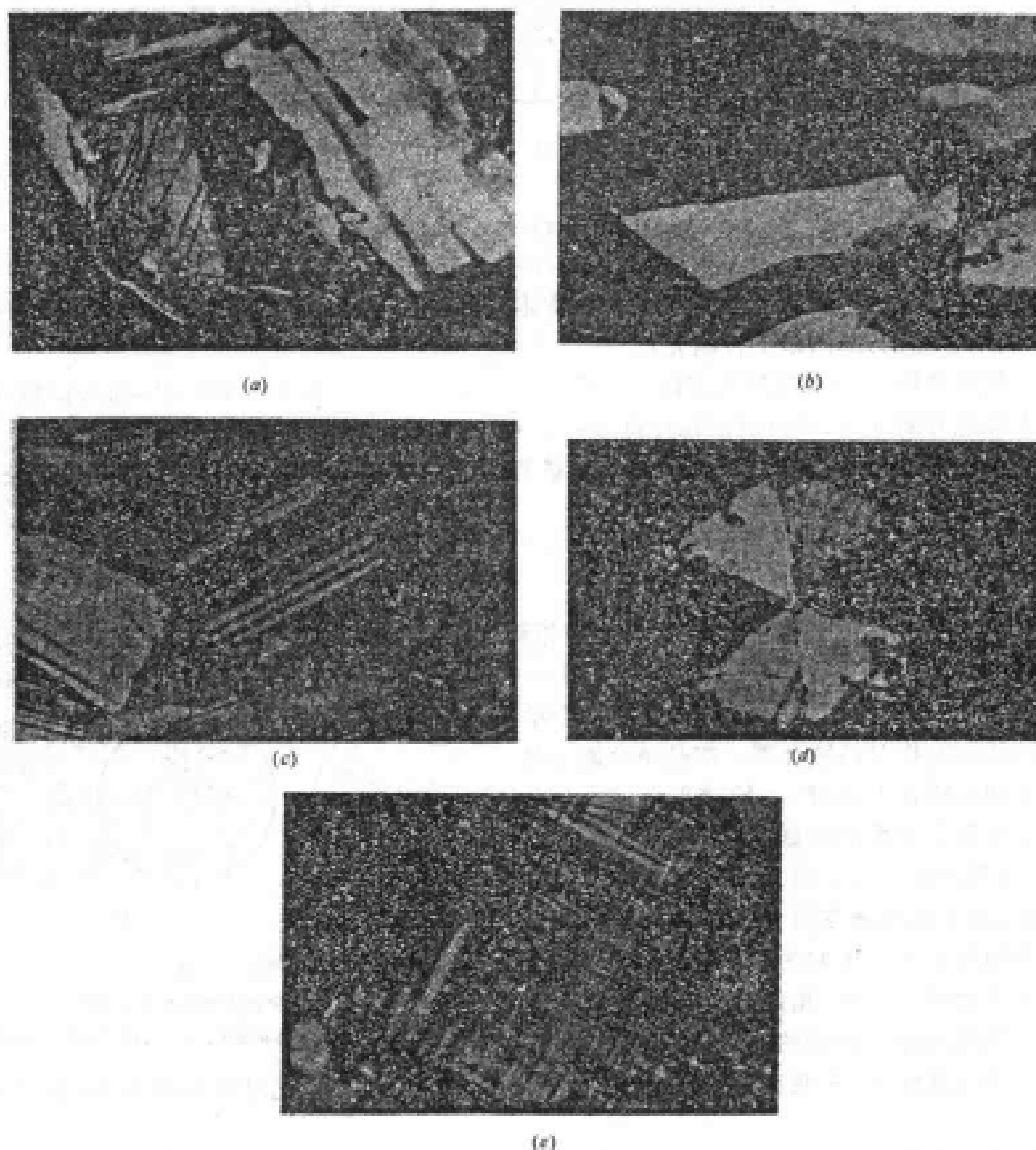


图 4.4.20　双晶的几种类型

(*a*)简单双晶(辉石)；(*b*)卡式双晶(正长石)；(*c*)聚片双晶(斜长石)；(*d*)六连晶(堇青石)；(*e*)格子状双晶(微斜长石)

5　锥光镜下的晶体光学性质

前一章中介绍了利用近于平行的入射光波，在正交偏光镜间测定一些晶体光学性质。还有一些重要的晶体光学性质，如晶体的轴性、光性符号、光轴角大小及晶体切面的准确方位等问题尚未解决。本章就是解决这些问题。

5.1　锥光镜的装置及光学特点

在正交偏光镜（$PP \perp AA$）的基础上，于下偏光镜之上，载物台之下，加上一个聚光镜（把聚光镜升到最高位置），换用高倍物镜，推入勃氏镜或去掉目镜，便完成了锥光镜的装置。

加入聚光镜的作用是使透出下偏光镜的平行偏光束变成锥形偏光束（图 4.5.1）。锥形偏光束与平行偏光束的重要区别，在于平行偏光束基本是同一方向垂直射入矿片；而锥形偏光束是以不同方向射入矿片。在锥形偏光束中，除中央一条光波垂直射入矿片之外（图 4.5.1），其余各光波都是倾斜射入矿片，而且愈外倾斜角度愈大，在矿片中所经历的距离愈外愈长。锥形偏光束中的偏光，不管如何倾斜，其振动面仍与下偏光镜振动面平行，即在薄片平面上的投影方向总是与 PP 方向平行。

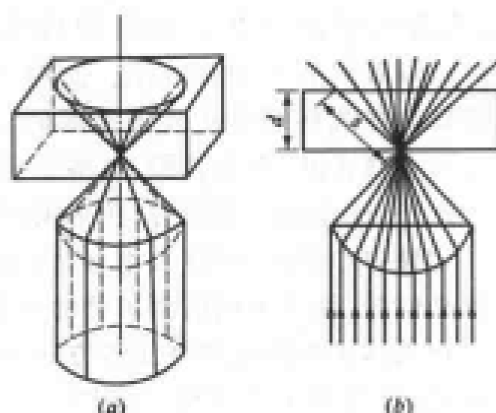


图 4.5.1　通过聚光镜以后的锥形偏光
(a)立体图；(b)剖面图

非均质体矿物光学性质随方向而异，垂直不同方向入射光的光率体切面不同，其长短半径在薄片平面上的方位不完全相同，它们与上、下偏光镜振动面方向 AA、PP 之间的关系不完全相同。许多不同方向入射光波同时通过矿片后，到达上偏光镜所发生的消光与干涉效应也各不相同。因此，锥光镜下观察到的，应当是各个不同方向入射光通过矿片后所产生的消光与干涉效应的总和。它们构成特殊的图形，称为干涉图。

换用高倍物镜的作用，在于能接纳较大范围的倾斜入射光波（图 4.5.2）。低倍物镜的数值孔径小，工作距离长，通常只能接纳与薄片法线成 5°夹角以内的光波，与平行薄片法线的入射光波相近（基本上相当于平行光波），干涉图不完整而且不清楚。高倍物镜的数值孔径较大，工作距离短，通常能接纳与薄片法线成 60°夹角以内的倾斜入射光，其干涉图较完整而且较清晰。一般说来，放大倍率相同的高倍物镜，其数值孔径愈大，干涉图

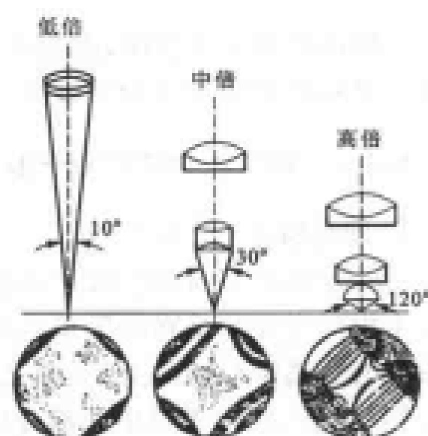


图 4.5.2　放大倍率不同的物镜能接纳的倾斜光锥范围及显示的干涉图

愈完整。

观察干涉图时，为什么必须去掉目镜或推入勃氏镜。因为锥光镜下所观察的干涉图，不是矿片本身的形象，而是锥形偏光中各个不同方向偏光同时通过矿片后，到达上偏光镜所产生的消光与干涉效应总和，即观察的是干涉图（光源像）。干涉图的成像位置不在薄片平面上，而是在物镜的后焦平面上（图 4.5.3）。去掉目镜，能直接观察镜筒内物镜后焦平面上的干涉图实像，其图形虽小却很清晰。如果镜筒中装有针孔光阑或针孔目镜，观察细小矿物颗粒干涉图时，其效果会更好。不去掉目镜，则必须推入勃氏镜才能看到干涉图。此时，勃氏镜与目镜联合组成一个宽角度望远镜式的放大系统，其前焦平面恰在干涉图的成像位置（图 4.5.3）可看到放大的干涉图。其图形虽大，但较模糊。在观察细小矿片干涉图时，如果勃氏镜上附有锁光圈，缩小光圈，观察效果会更好。

此外，锥光镜下观察时，还必须严格校正中心。如果中心不准，转动载物台时，所测矿物离开原来位置，将看不到所测矿物的干涉图。

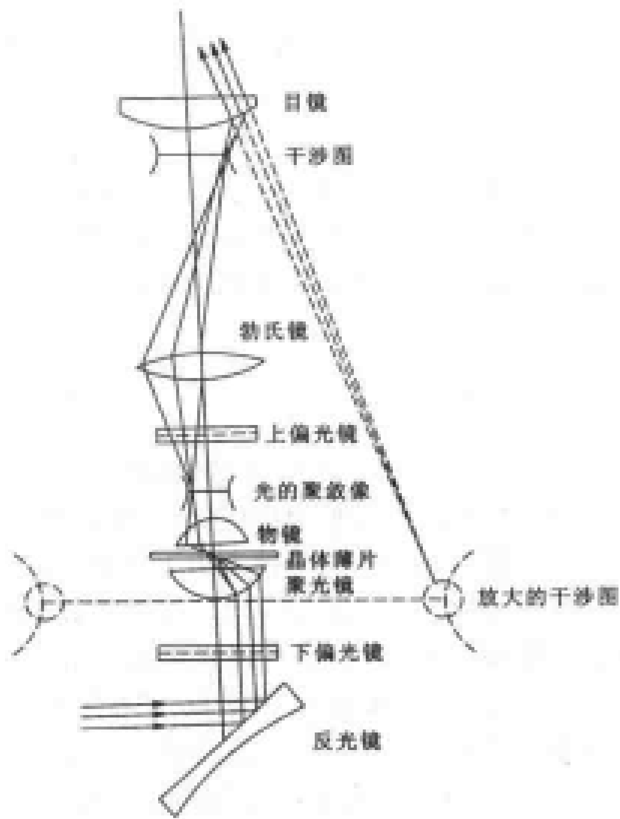


图 4.5.3　锥光镜的光路及干涉图成像位置示意图

均质体矿物的光学性质各方向一致，任何方向的入射光都不发生双折射，在正交偏光镜间全消光，锥光镜下看不到干涉图。非均质体的光学性质随方向而异，在锥光镜下能形成干涉图，其干涉图特点随矿物的轴性和切片方面而异。

5.2　一轴晶干涉图

一轴晶矿物的干涉图，因切片方向不同而不同，主要有三种类型，即垂直光轴切片、斜交光轴切片及平行光轴切片的干涉图。

5.2.1　垂直光轴切片的干涉图

1. 图像特点（图 4.5.4）

由一个黑十字与同心圆干涉色色圈组成，黑十字由两个互相垂直的黑带组成，黑带即消光影。两个黑带分别与上、下偏光镜振动方向 *AA*、*PP* 平行，两个黑带中心部分往往较窄，边缘部分较宽；黑十字交点位于视域中心（与目镜十字丝交点重合），为光轴出露点。干涉色色圈以黑十字交点为中心，成同心环状，其干

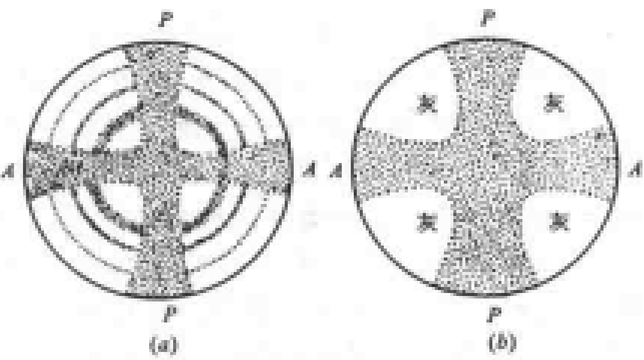


图 4.5.4　一轴晶垂直光轴切片的干涉图
(a) 双折射率较大的矿片；(b) 双折射率小的矿片（切片厚度相同）

涉色级序由中心向外逐渐升高，干涉色色圈愈外愈密。干涉色色圈的多少，取决于矿物的双折射率大小及薄片厚度。矿物的双折射率愈大，干涉色色圈愈多(图 4.5.4(*a*))；反之，双折射率愈小，干涉色色圈愈少，甚至在黑十字的四个象限内仅出现一级灰干涉色(图 4.5.4(*b*))。双折射率相同的矿片，厚度愈大，干涉色色圈愈多；反之，薄片愈薄，干涉色色圈愈少(图 4.5.5)。

转动载物台 360°，干涉图不发生变化。

2. 成因

在垂直光轴的薄片中，光轴方向垂直薄片平面。锥形光的特点是除中央一条光垂直薄片入射之外，其余各条光线都是倾斜射入薄片的(图 4.5.1)；而且愈外倾斜角度愈大。因此，锥形光中只有中央一条光是平行光轴入射，其余各光都是斜交光轴入射；而且愈外斜交角度愈大。根据第 1 章所述的光率体特征，除垂直中央一条光波的光率体切面为圆切面之外，垂直其余各个斜交光轴入射光波的光率体切面都是椭圆切面，而且其长短半径的大小及在薄片平面上的分布方位各不相同，它们与上、下偏光镜振动方向的关系也各不相同。因此，它们在正交偏光镜间所发生的消光与干涉效应不同。

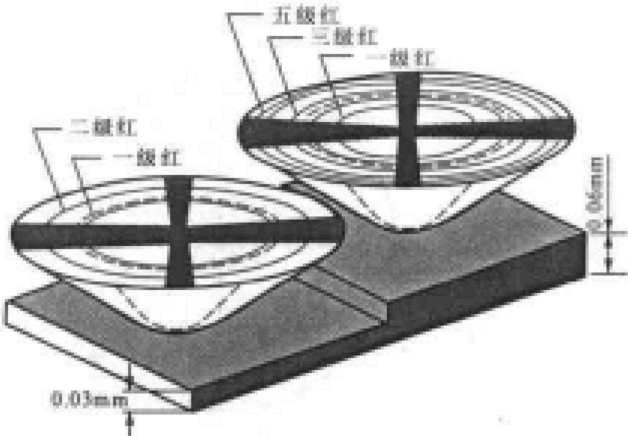


图 4.5.5　干涉色色圈与薄片厚度的关系
(据 F. D. Bloss，1961)

垂直光轴的切片在锥光镜下所显示的干涉图就是锥形偏光中各光波同时通过矿片后，到达上偏光镜所发生的消光与干涉现象总和。黑十字代表消光部分(消光影)；干涉色色圈代表发生干涉作用的部分。因此，要了解干涉图的成因，必须首先了解垂直锥形光中各入射光波的光率体椭圆半径在矿片平面上的分布方位(即常光与非常光振动方向的分布方位)。这种分布方位图，通常称为波向图。因为光率体椭圆切面半径方向代表光波垂直该切面入射时，发生双折射分解形成两个偏光的振动方向。因而波向图就是表示光波振动方向的图解。

一轴晶光率体各种椭圆半径在空间的分布方位，可用球面投影方法作出。在一轴晶光率体之外，套上一个圆球体，并使球心与光率体中心重合(图 4.5.6)。把垂直各入射光波的光率体椭圆半径(N_e'与N_o')投影到球面上，即可得出各个椭圆切面半径(常光与非常光振动方向)在球面上的分布方位。球面上经线与纬线的交点代表各入射光波的出露点。经线的切线方向，代表非常光波的振动方向(N_e'或 N_e 半径方向)；纬线的切线方向，代表常光的振动方向(N_o 半径方向)。

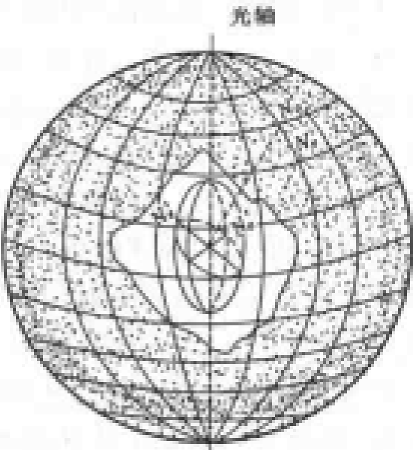


图 4.5.6　一轴晶中常光和非常光振动方向在球面上的分布方位

把球面上的投影结果，再用正射投影方法，投影到平面上，即可得出一轴晶不同方向切片上光率体椭圆半径分布方位图(波向图)。图 4.5.7(*a*)为一轴晶垂直光轴切片的波向图。其中心为光轴在薄片平面上的出露点；围绕中心的同心圆与放射线的交点，代表锥形光中各入射光波在薄片平面上的出露点；放射线方向，代表非常光波的振动方向

(N_e'半径方向);同心圆的切线方向,代表常光的振动方向(N_o 半径方向)。知道了垂直于光轴切片上光率体椭圆半径的分布方位之后,根据正交偏光镜间的消光与干涉原理,便很容易理解干涉图的形成原因。当矿片上光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向平行时,消光而构成黑带。当光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向斜交时,发生干涉作用产生干涉色。

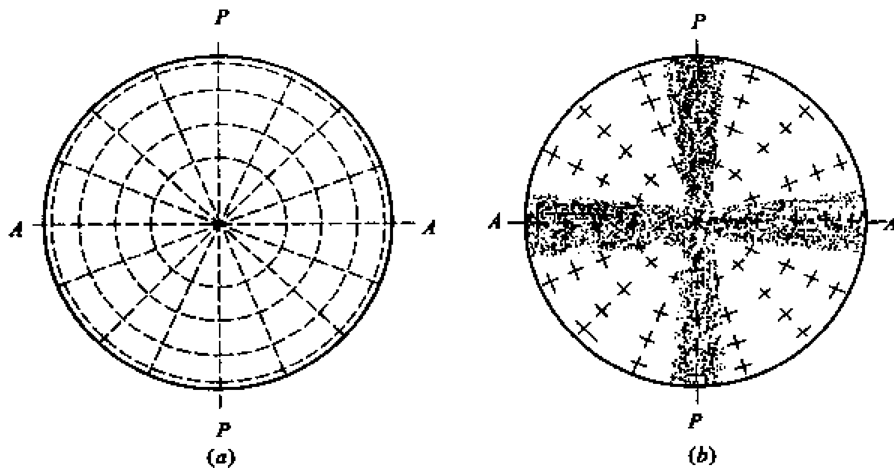


图 4.5.7 一轴晶垂直光轴切片的波向图(a)及黑十字的成因(b)

黑十字的成因:

垂直光轴切片的波向图中,东西、南北方向上的光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 平行或近于平行的那些部位(图 4.5.7(b)),在正交偏光镜间消光或近于消光。因此,形成分别与 AA、PP 平行的两个黑带,它们互相垂直构成黑十字。由于非常光振动方向呈放射线,与 AA、PP 夹角相等的椭圆半径方向(图 4.5.7),其消光情况应为相同,由图中可看出夹角相等的椭圆半径方向是中部窄而边部宽,因而黑带中部较窄而边缘较宽。如果双折射率低时,这种现象不明显。如果偏光显微镜的上、下偏光镜振动方向 AA、PP 位置不在东西、南北方向上,则干涉图中的黑十字也不在东西、南北方向,借此可以校正上、下偏光镜的位置。

干涉色色圈的成因:

在黑十字的四个象限内,光率体椭圆半径方向与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 斜交(图 4.5.7(b)),在正交偏光镜间发生干涉作用,如果光源为白光则产生干涉色。

为什么干涉色成同心环状,而且干涉色级序愈外愈高?因为入射光波是以光轴为中心的锥形光(图 4.5.8(a))。中央一条光波是平行光轴入射,不发生双折射,其双折射率为零(光程差等于零),其余各光斜交光轴入射,而且由中央向外,入射光波与光轴的夹角愈来愈大,其双折射率值逐渐增加。光波在薄片中经历的距离也是愈外愈长(相当于薄片厚度逐渐增大)。因此,光程差由中心向外逐渐增大(图 4.5.8(b)),相应的干涉色级序也随之逐渐升高。锥形光中与光轴夹角相等的各入射光波,所形成的光程差相等,相应的干涉色相同,因而构成以光轴出露点(黑十字交点)为中心的同心环状干涉色色圈,而且干涉色级序愈外愈高。

垂直光轴切片的波向图中,其光率体椭圆半径呈放射状对称分布。无论如何转动矿片,总是东西、南北方向的光率体椭圆半径与 AA、PP 平行,其余的半径与 AA、PP 斜交,因而黑十字与干涉色色圈位置不发生变化。

3. 垂直光轴切片干涉图的应用

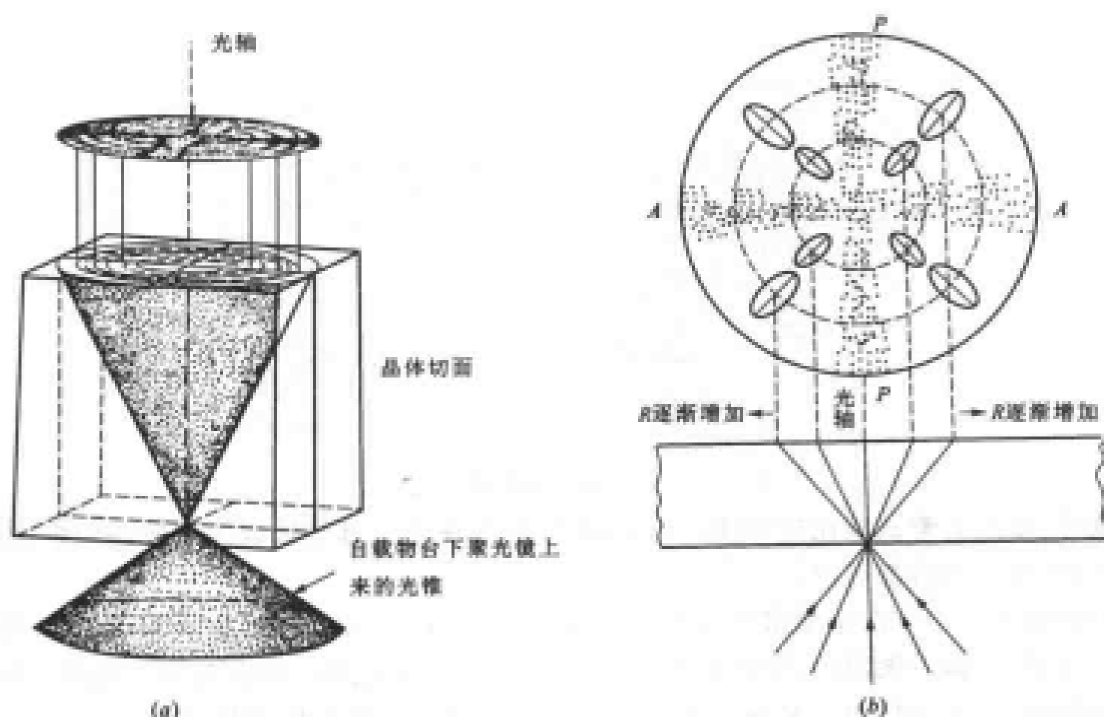


图 4.5.8 干涉色色圈的成因（正光性）

①确定轴性及切片方向

根据干涉图的形象特点，可确定为一轴晶垂直光轴的切片。一轴晶其他方向切片及二轴晶矿片不具这种特征的干涉图。

②测定光性符号

如前所述，一轴晶矿物的光性符号是根据主折射率值 N_e 与 N_o 的相对大小确定的。当 $N_e>N_o$（即 $N_e=N_g$）时为正光性，当 $N_e<N_o$（$N_e=N_p$）时为负光性。只要确定了 N_e（或 N_e'）与 N_o 的相对大小，就解决了一轴晶矿物的光性正负问题。

一轴晶垂直光轴切片的干涉图中，黑十字的四个象限内，放射线方向代表 N_e' 的方向；同心圆的切线方向代表 N_o 的方向（图 4.5.9）。知道了 N_e' 与 N_o 在干涉图中的分布方位之后，加入试板，观察干涉图中黑十字四个象限内干涉色的升降变化，根据补色法则即能确定 N_e' 与 N_o 的相对大小。如图 4.5.10(*a*)所用试板短边方向为 N_g，长边方向为 N_p，加入试板之后，干涉图黑十字的一、三象限内干涉色级序升高，表示此二象限内光率体椭圆半径 N_e' 及 N_o 与试板是同名半径平行，证明 $N_e'=N_g$（即 $N_e'>N_o$）；二、四象限内的干涉色级序降低，表示此二象限内光率体椭圆半径 N_e' 及 N_o 与试板为异名半径平行，仍然证明 $N_e'=N_g$（即 $N_e'>N_o$），故属正光性。负光性的干涉色升降情况与此相反（图 4.5.10(*b*)）。如果试板上 N_g 与 N_p 方向更换，或者试板插入方向改变，则干涉图中黑十字四个象限内的干涉色升降变化，恰与上述情况相反。因此，在实际鉴定工作中，切不要死记，必须弄清原理。

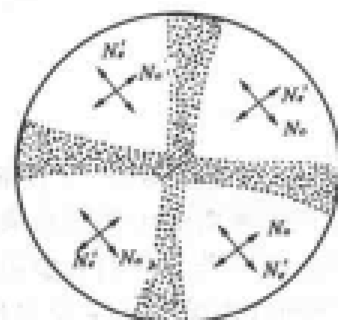


图 4.5.9 一轴晶垂直光轴切片干涉图中 N_e' 与 N_o 的方位

测定光性符号时，使用什么试板较方便，可根据具体情况确定。通常是色圈少或只具一级

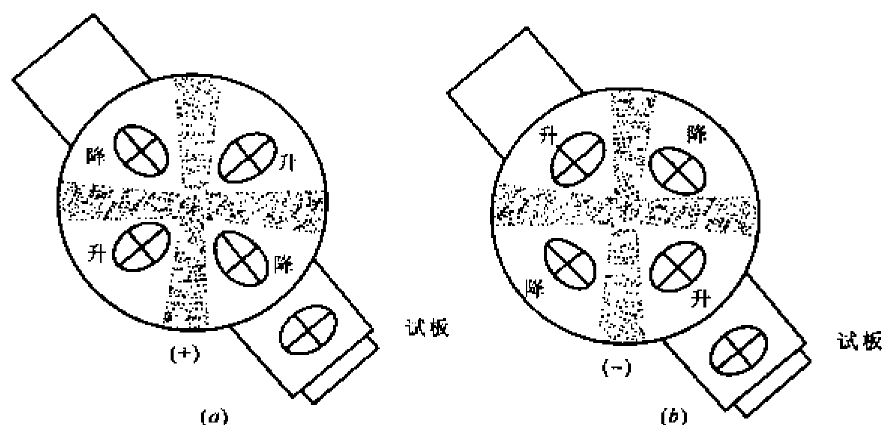


图 4.5.10 一轴晶光性符号的测定

灰干涉色时，使用石膏试板比较方便。当色圈较多时，使用云母试板较为方便。如果操作较为熟练，使用任何补色器都可以。

当干涉图黑十字的四个象限内仅见一级灰干涉色时，加入石膏试板(图 4.5.11)后，黑十字变为一级紫红；四个象限内，干涉色升高的两个象限，干涉色由一级灰变为二级蓝；干涉色降低的两个象限内，干涉色由一级灰变为一级橙黄。也可以使用云母试板，加入云母试板后，黑十字变为一级灰；干涉色升高的两个象限内，干涉色由一级灰变为一级橙黄；干涉色降低的两个象限内，干涉色由一级灰变为黑色。

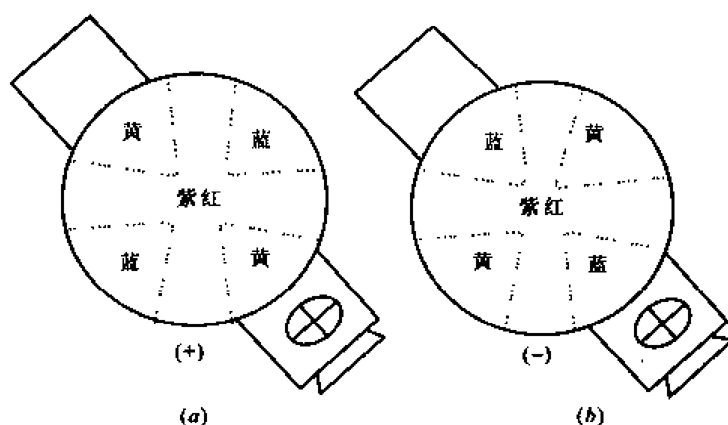


图 4.5.11 干涉图黑十字的四个象限内仅见一级灰，加入石膏试板后的变化情况

当干涉图的干涉色色圈较多时，加入云母试板后(图 4.5.12)，黑十字变为一级灰白。在干涉色级序升高的两个象限内，靠近黑十字交点原为一级灰的位置，干涉色级序升高变为一级黄，因而在靠近黑十字交点处，出现对称的两个黄色小团团；原为一级黄的色圈，干涉色级序升高变为一级红，表现为红色色圈向内移动占据原黄色色圈位置；原为一级红的色圈，干涉色级序升高变为二级蓝，表现为蓝色色圈向内移动占据原红色色圈位置；同样的道理，每一个干涉色色圈的级序都升高一个色序，因而显示出这两个象限内的整个干涉色色圈都向内移动。在干涉色级序降低的两个象限内，靠近黑十字交点原为一级灰的位置，干涉色级序降低变为黑色，因而在靠近黑十字交点处，出现对称的两个黑色小团团；原为一级黄的色圈，干涉色级序降低变为一级灰，表现为灰色色圈向外移动占据原黄色色圈位置；原为一级红的色圈，干涉色级序降低变为一级黄，表现为黄色色圈向外移动占据原红色色圈位置；同样的道理，每一个干涉色色圈的级序都降低一个色序，因而显示出这两个象限内的整个干涉色色圈都向外移动。

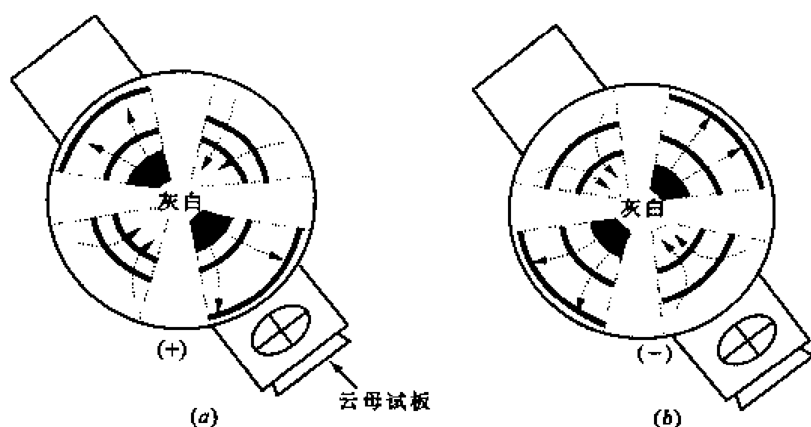


图 4.5.12　干涉图黑十字的四个象限内色圈较多，加入云母试板后的变化情况

如果干涉色色圈多而密，加入云母试板后，干涉色色圈移动情况看不清楚，可以使用石英楔或贝瑞克补色器。随着石英的逐渐插入(或逐渐转动贝瑞克补色器)时，在干涉色级序升高的两个象限内，干涉色色圈连续向内移动；在干涉色级序降低的两个象限内，干涉色色圈连续向外移动。

干涉色色圈多的干涉图，也可以使用石膏试板。加入石膏试板后，黑十字变为一级紫红；在干涉色级序升高的两个象限内，靠近黑十字交点原为一级灰的位置，干涉色级序升高变为二级蓝，因而出现对称的两个蓝色小团团，其他干涉色色圈基本不变；在干涉色降低的两个象限内，靠近黑十字交点原为一级灰的位置，干涉色级序降低变为一级橙黄，因而出现对称的两个黄色小团团，第一个红色色圈变为黑色圈，其他干涉色色圈也基本不变。

5.2.2　斜交光轴切片的干涉图

1. 图像特点

在斜交光轴的切片中，光轴的位置是倾斜的；光轴在薄片平面上的出露点(黑十字交点)，不在视域中心。所以斜交光轴切片的干涉图是由不完整的黑十字和不完整的干涉色圈组成(图 4.5.13 及图 4.5.14)。

当光轴方向与薄片法线的夹角不大时，光轴出露点(黑十字交点)虽不在视域中心，但仍在视域内(图 4.5.13)。转动载物台，黑十字交点绕视域中心作圆周移动，其黑带作上下、左右平行移动，干涉色色圈随黑十字交点移动。

当光轴方向与薄片法线的夹角较大时，光轴出露点(黑十字交点)落在视域之外(图 4.5.14)，视域内只能见到一条黑带及部分干涉色色圈。转动载物台，黑带作上下、左右平行移动，并交替出现在视域内，干涉色色圈亦随之移动。

当光轴方向与薄片法线的夹角很大时，黑带较宽大。转动载物台，黑带呈弯曲状移过视域(图 4.5.15)。这种干涉图不能判断轴性，因为它与二轴晶干涉图不易区分。

2. 斜交光轴切片干涉图的应用

①当光轴倾角不太大时，可以确定轴性及切片方向。

②测定光性符号。

当黑十字交点在视域内时，测定光性符号的方法与垂直光轴切片干涉图的方法完全相同。如果黑十字交点在视域之外时，转动载物台，根据黑带移动情况，可以确定黑十字交点在

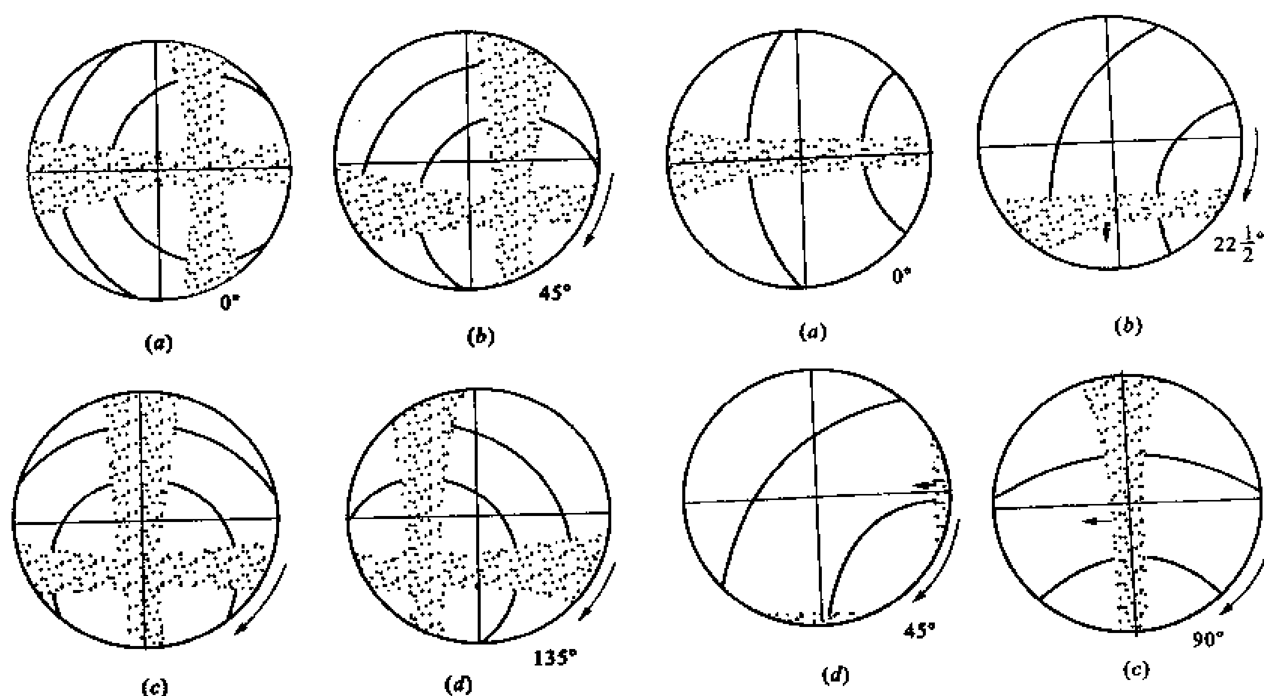


图 4.5.13 斜交光轴切片的干涉图（光轴倾角不大）

图 4.5.14 斜交光轴切片的干涉图（光轴倾角较大）

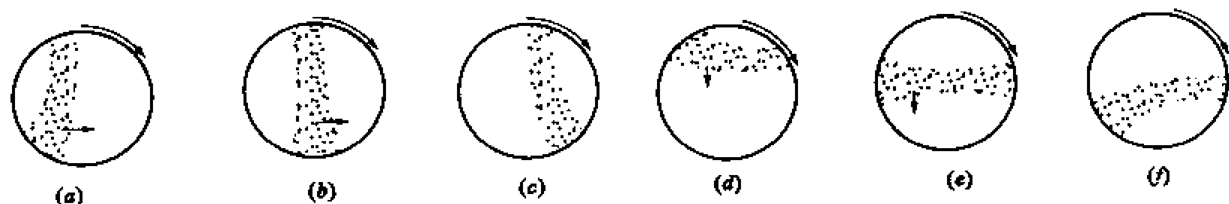


图 4.5.15 斜交光轴切片的干涉图（光轴倾角很大）

视域外的位置。当视域内只见一条横的黑带时，顺时针转动载物台，黑带向下移动(图 4.5.16(*a*))，证明黑十字交点必在视域外的右方；黑带向上移动(图 4.5.16(*b*))，证明黑十字交点必在视域外的左方。当视域内只见一条直立的黑带时，顺时针转动载物台，黑带向左移动(图 4.5.16(*c*))，证明黑十字交点必在视域外的下方；黑带向右移动(图 4.5.16(*d*))，证明黑十字交点必在视域外的上方。当视域没有黑带时，转动载物台，视域内将可见一条纵向或直立黑带，再按上述规律确定黑十字交点在视域外的位置。

找出黑十字交点在视域外的方位之后，即能确定视域内属于黑十字的那一个象限。此时可根据垂直光轴切片干涉图的方法，测定光性符号(图 4.5.17)。当黑十字的四个象限内仅见一级灰时，加入石膏试板后，干涉图的变化情况如图 4.5.18(*a*)；当色圈多时，加入云母试板后，干涉图的变化情况如图 4.5.18(*b*)。

5.2.3 平行光轴切片的干涉图

1. 图像特点

当光轴方向与上、下偏光镜振动方向之一平行时，为一个粗大模糊的黑十字，几乎占据整个视域(图 4.5.19(*a*))。稍稍转动载物台，粗大黑十字从中心分裂，并沿光轴方向迅速退出视

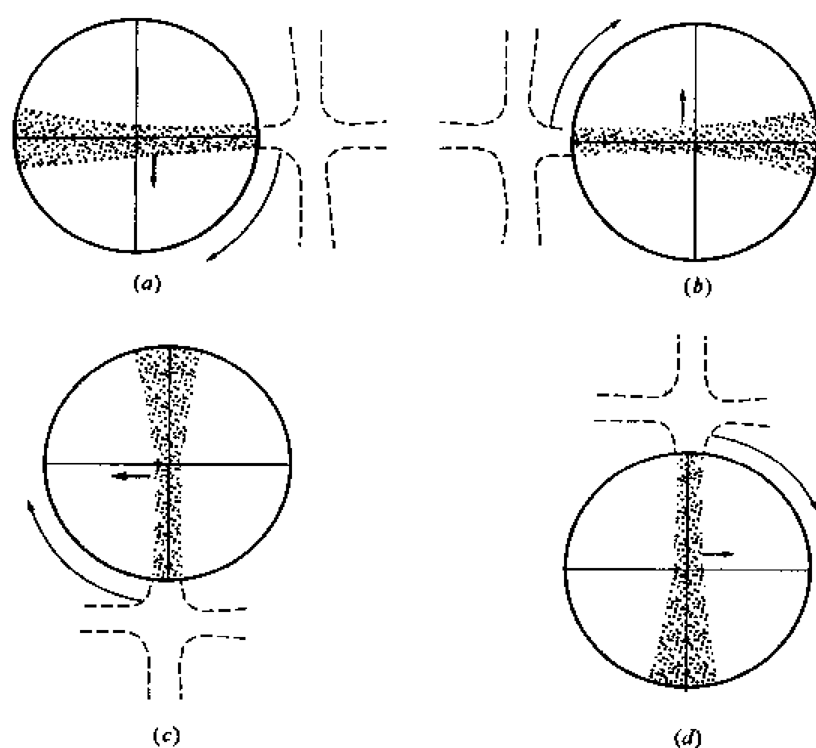


图 4.5.16　转动载物台，斜交光轴切片干涉图中的黑带移动规律

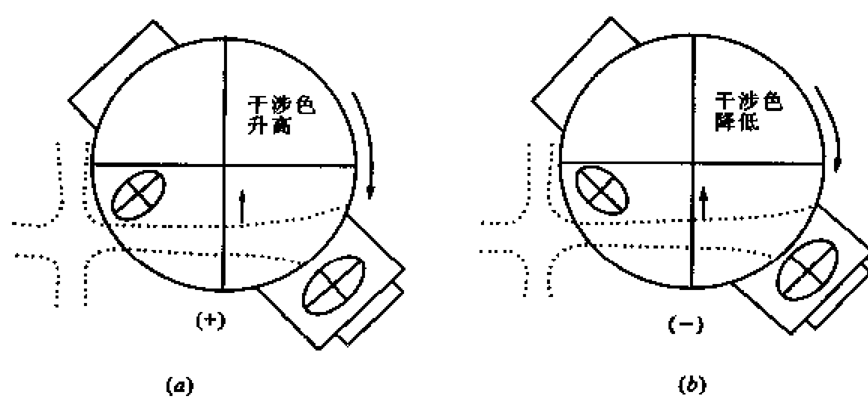


图 4.5.17　一轴晶斜交光轴切片干涉图上光性符号的测定

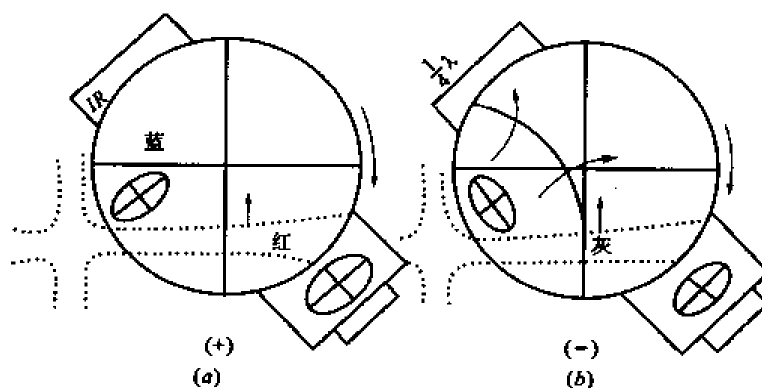


图 4.5.18　一轴晶斜交光轴切片干涉图加试板后的变化情况

域(大约转动 12°～15°),这个转角称明亮角。因为变化迅速,故称瞬变干涉图或闪图。

当光轴方向与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 成 45°夹角时,视域最亮。如果矿物的双折射率值较大时,则在相对的象限内出现对称的弧形干涉色色带(图 4.5.19(*b*))。在光轴方向的两个象限内,干涉色由中心向两边逐渐降低;在垂直光轴方向的两个象限内,干涉色由中心向两边逐渐升高。如果矿物的双折射率较低,则不出现弧形色带而仅为一级灰白干涉色。

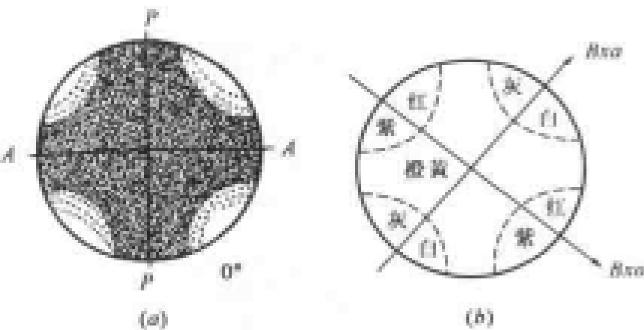


图 4.5.19 一轴晶平行光轴切片的干涉图

2. 成因

平行光轴切片的波向图中(图 4.5.20),当光轴与上、下偏光镜振动方向之一平行时,大部分的光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向平行或近于平行(图 4.5.20 中小圆圈以内),在正交偏光镜间,应当消光或近于消光,因而形成粗大模糊的黑十字。稍转载物台,大部分光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向 AA、PP 斜交,而且是中心部分的光率体椭圆半径首先与 AA、PP 斜交,光轴方向的光率体椭圆半径与 AA、PP 最后斜交。因此,粗大黑十字从中心分裂,并沿光轴方向迅速退出视域而视域明亮,出现干涉色。

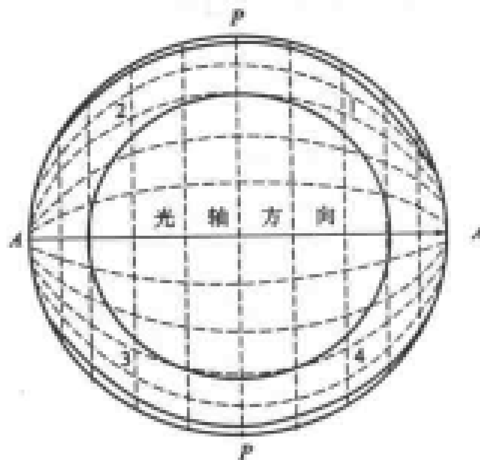


图 4.5.20 一轴晶平行光轴切片的波向图

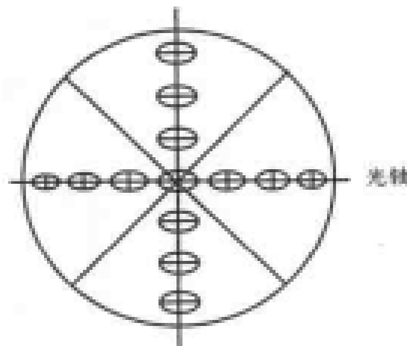


图 4.5.21 平行光轴切片干涉图中双折射率值大小变化示意图

当光轴方向与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时,为什么出现对称的弧形干涉色色带,而且沿光轴方向,干涉色从中心向两边逐渐降低,而垂直光轴方向,干涉色由中心向两边逐渐升高。由图 4.5.21(正光性)可看出,在平行光轴方向上,由中心向两边,短半径 N_o 的长短不变,而长半径 N_e' 逐渐变短,促使其双折射率逐渐变小。虽然倾斜入射光波经过矿片距离愈外愈长(即薄片厚度加大),但矿片厚度不大,且视域范围较小,在此范围内不足以抵消由于双折射率减小所引起的光程差减小,所以在此方向上,由中心向两边干涉色仍然逐渐降低。在垂直光轴的方向上,由中心向两边的各个点上,光率体椭圆半径均为 N_o 与 N_e,其双折射率值相等,但由于倾斜入射光波通过薄片的距离愈外愈长,相当于厚度向外增加,引起光程差逐渐增大,因而干涉色由中心向两边逐渐升高。

3. 一轴晶平行光轴切片干涉图的应用

①当轴性已知时,可以确定切片方向,不能确定轴性,因为它与二轴晶平行光轴面切片的干涉图很难区分。

②当轴性已知时,也可以测定光性符号。

转动载物台,黑带退出的方向即光轴方向。使光轴方向与上、下偏光镜振动方向成45°夹角,此时视域最亮。在这种干涉图中,N_e平行光轴方向,N_o垂直光轴方向。加入试板,观察整个视域内干涉色级序的升降变化,根据补色法则确定N_e与N_o的相对大小之后,即能确定光性正负(图4.5.22)。如果加入试板后,整个视域内干涉色级序降低(图4.5.22(a)),异名半径平行,证明$N_e=N_g$(即$N_e>N_o$),为正光性。反之,整个视域内干涉色级序升高(图4.5.22(b)),同名半径平行,证明$N_e=N_p$(即$N_e<N_o$),为负光性。如果光轴方向已确定,取消锥光装置,在正交偏光镜间亦可测定光性符号。把光轴方向转至45°位置,加入试板,观察矿片干涉色级序的升降变化,确定N_e与N_o的相对大小,能决定光性的符号。

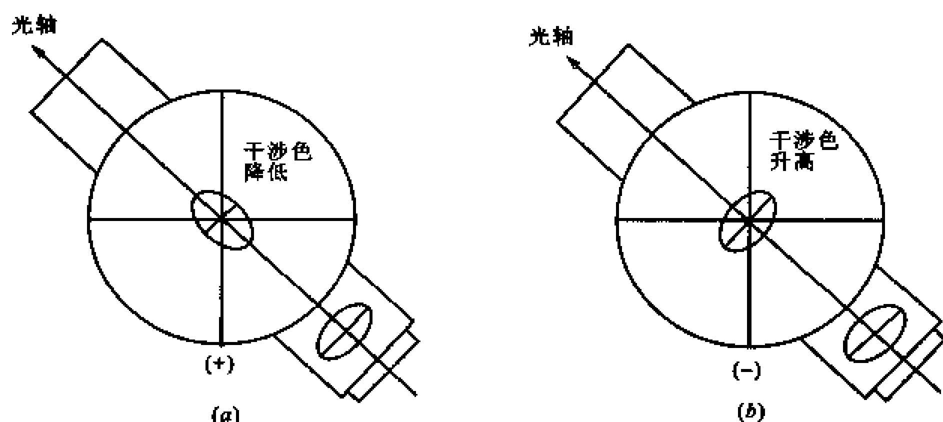


图4.5.22 一轴晶平行光轴切片干涉图光性符号的测定

5.3 二轴晶干涉图

二轴晶光率体的对称程度低于一轴晶光率体,锥光镜下二轴晶的干涉图比一轴晶更为复杂。主要有五种类型干涉图,即垂直锐角等分线切片、垂直一个光轴切片、斜交光轴切片、垂直钝角等分线切片及平行光轴面切片的干涉图。

5.3.1 垂直锐角等分线(Bxa)切片的干涉图

1. 图像特点(图4.5.23)

当光轴面(A_p)与上、下偏光镜振动方向之一(PP或AA)平行时,干涉图由一个黑十字及"∞"字形干涉色色圈组成(图4.5.23)。黑十字交点位于视域中心,为Bxa的出露点;黑十字的两个黑带分别平行上、下偏光镜振动方向(AA、PP),其粗细不等,在光轴面方向的黑带较细,在两个光轴出露点上更细,垂直光轴面方向(N_m方向)的黑带较宽。"∞"字形干涉色色圈以两个光轴出露点为中心,其干涉色级序向外逐渐升高,而且愈外色圈愈密。干涉色色圈的多少取决于矿物的双折射率及矿片厚度。双折射率愈大,矿片愈厚,干涉色色圈愈多(图4.5.23(a));双折射率愈小,矿片愈薄,干涉色色圈愈少,甚至在黑十字四个象限内仅出现一级灰干涉色(图4.5.23(d)),此时干涉图中两个黑带的宽度近于相等。

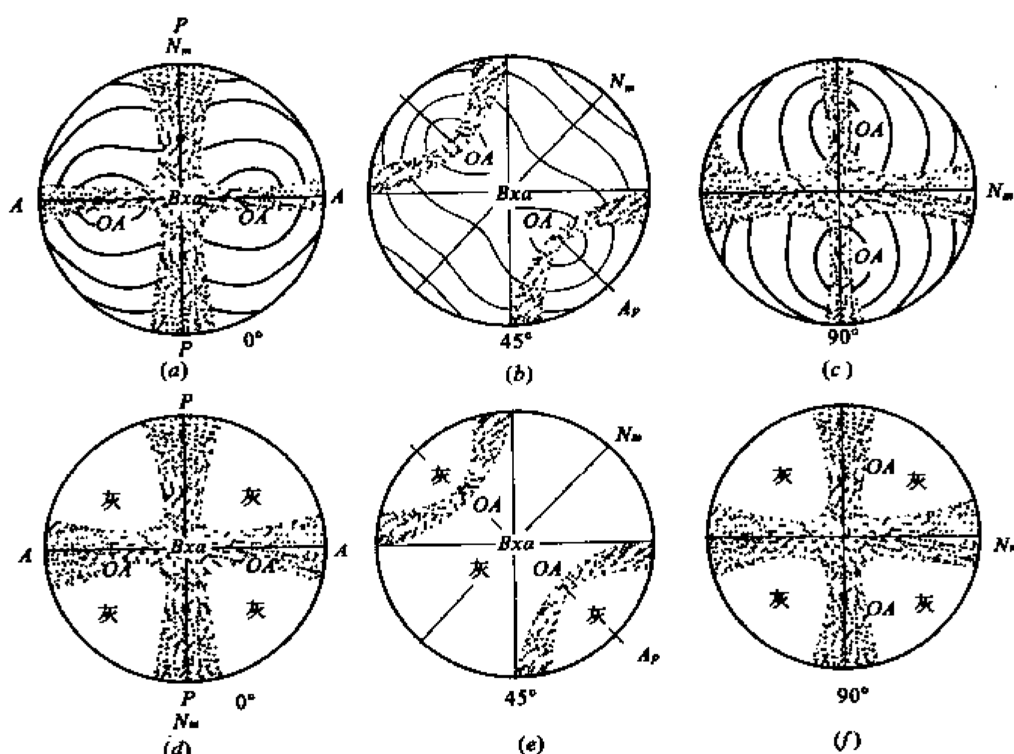


图 4.5.23 二轴晶垂直 Bxa 切片的干涉图

转动载物台，黑十字从中心分裂形成两个弯曲黑带；当光轴面方向与上、下偏光镜振动方向(AA、PP)成 45°夹角(即转动物台 45°)时，两个弯曲黑带顶点之间的距离最远(图 4.5.23 (b)、(e))。弯曲黑带凸向 Bxa 出露点(视域中心)。两个弯曲黑带的顶点代表两个光轴的出露点，两者之间的距离与光轴角($2V$)大小成正比，其连线代表光轴面方向，通过 Bxa 出露点，垂直光轴面的方向代表 N_m 方向。

继续转动载物台，弯曲黑带逐渐向视域中心移动，当转至 90°时，弯曲黑带又合成黑十字，但其粗细黑带已经互换了位置(图 4.5.23(a)、(c)和(d)、(f))。继续转动载物台，黑十字又从中心分裂，当转至 135°时，弯曲黑带特征与 45°位置时相同，但光轴出露顶点更换了 90°的位置。再继续转动载物台，弯曲黑带又向视域中心移动，当转至 180°时，回复原来黑十字特征。

在转动物台时，"∞"字形干涉色色圈随光轴出露点移动，但其形状不改变。

2. 成因

二轴晶干涉图的成因，仍可用波向图解释。波向图可应用拜阿特—弗伦涅尔定律(简称拜—弗定律)作出。

拜—弗定律：沿任意方向射入二轴晶矿物的光波，其波法线与两个光轴构成两个相交的平面，其夹角的两个平分面迹线方向，就是垂直该光波的光率体椭圆切面长短半径方向(即该光波分解形成两种偏光的振动方向)。在图 4.5.24 中，OW 为任意方向入射光波法线，OA 与 OB 为两个光轴，WN 与 Wn 代表垂直 OW 光波法线的光率体椭圆长短半径方向。如果把垂直各个方向入射光波的光率体椭圆半径投影到球面上，即得所有光率体椭圆半径在球面上的分布方位图(图 4.5.25)。再通过正射投影，即可得出二轴晶不同方向切片上光率体椭圆半径的分布方位图(波向图)。垂直 Bxa 切片的波向图也可以应用拜—弗定律直接作出。在垂直 Bxa 切片上，入射光波出露点与两个光轴出露点连线夹角的两个分角线方向代表垂直该入射

光波(波法线)的光率体椭圆半径方向(图 4.5.26)。

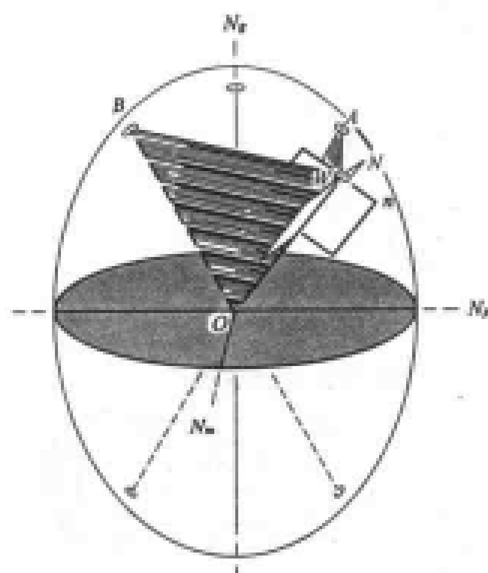


图 4.5.24　拜一弗定律示意图

(据 F. D. Bloss, 1961,略加修改)

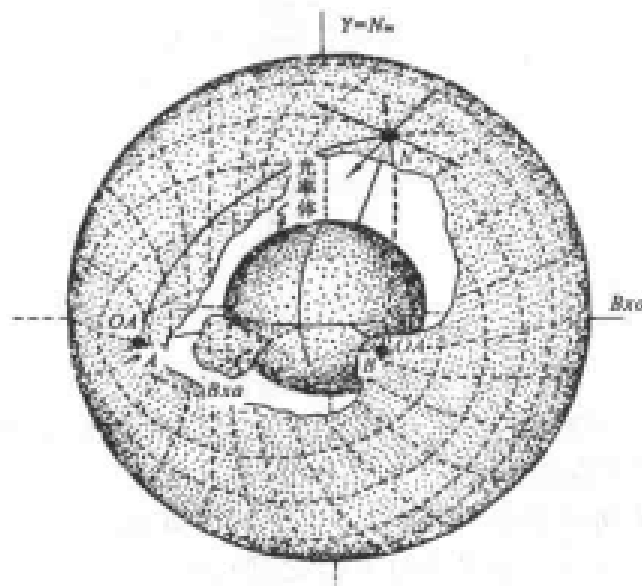


图 4.5.25　二轴晶光率体椭圆半径在球面上的分布方位图

(据 E. E. Wahlstrom,略加修改)

黑十字及弯曲黑带的成因:从垂直 Bxa 切片的波向图(图 4.5.27)中可看出,当光轴面迹线方向与上、下偏光振动方向之一平行时(图 4.5.28(a)),在光轴面迹线及 N_m 方向上,光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行,在正交偏光镜间应当消光或近于消光,故构成黑十字。在 N_m 方向上,光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行的范围较宽,故其黑带较宽;在光轴面迹线方向上,光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行的范围较窄,在光轴出露点处更窄,故光轴面方向的黑带较窄,光轴出露点处更窄。

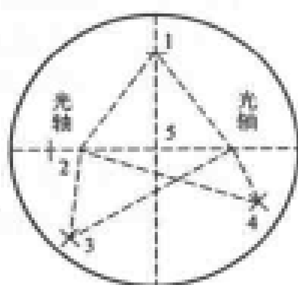


图 4.5.26　拜一弗定律平面示意图

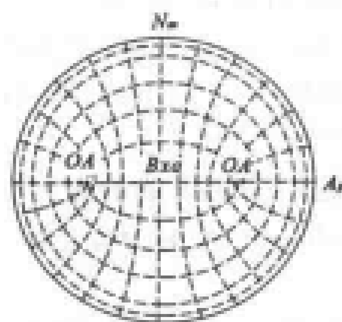


图 4.5.27　垂直 Bxa 切片的波向图($2V=60°$)

转动载物台,波向图中心部分的光率体椭圆半径首先与 AA、PP 斜交而变亮,所以黑十字从中心分裂。当光轴面与 AA、PP 成 45°夹角时(图 4.5.28(b)),只有两个弯曲黑带范围内的光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行,在正交偏光镜间消光或近于消光而构成对称的两个弯曲黑带。

干涉色色圈的成因:在黑十字或弯曲黑带范围以外,光率体椭圆半径与 AA、PP 斜交(图 4.5.28),在正交偏光镜间发生干涉作用,形成干涉色色圈(白光光源)。

为什么构成"∞"形干涉色色圈,而且干涉色级序愈外愈高?因为二轴晶有两个光轴(图 4.5.29)。光波沿两个光轴方向入射时,不发生双折射,其光程差等于零。斜交光轴入射的光

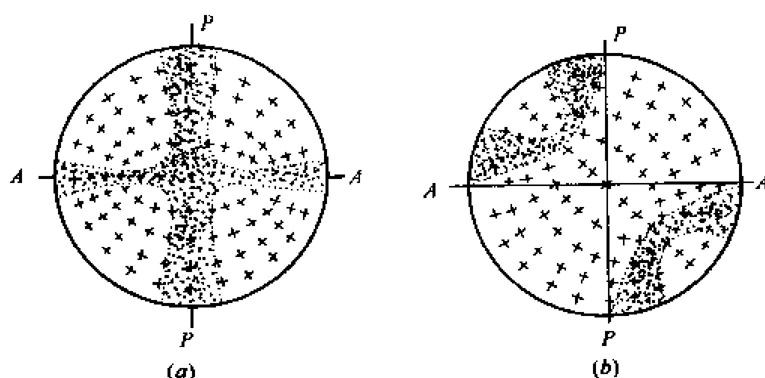


图 4.5.28 二轴晶垂直 Bxa 切片干涉图中黑十字(a)及弯曲黑带(b)的成因

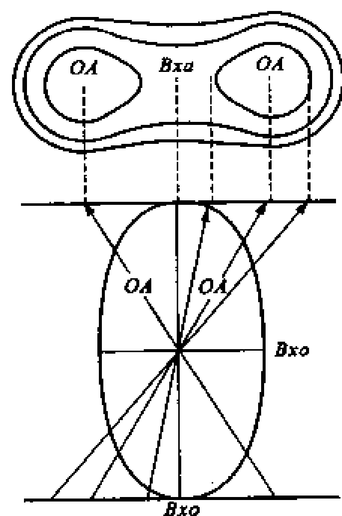


图 4.5.29 二轴晶垂直 Bxa 切片干涉图中干涉色色圈成因示意图
(下图为剖面图,上图为平面图)

波发生双折射,其光程差从光轴出露点的零起,向外逐渐增加,因而构成以两个光轴出露点为中心的"∞"形干涉色色圈,而且愈外干涉色级序愈高。在光轴出露点两侧,光程差增加的速度不相等。在光轴与 Bxa 之间(图 4.5.29),斜交光轴的入射光波,随着与光轴斜交角度的加大,其双折射率与光波通过矿片的厚度都逐渐增加,故其光程差增加速度较快。在光轴与 Bxa 之间,斜交光轴的入射光波,随着与光轴斜交角度的加大,虽其双折射率逐渐加大,但光波通过矿片的厚度逐渐减小,故其光程差增加速度较慢,而且在 Bxa 出露点达最大值(不再增加)。所以光轴出露点两侧,光程差相等点与光轴出露点的距离不等,在 Bxa 一侧距离较长,在 Bxo 一侧距离较短。因此,在两个光轴出露点周围,光程差相同的干涉色圈构成两个卵形,向外相联而合成"∞"形。

3. 二轴晶垂直 Bxa 切片干涉图的应用

(1)确定轴性及切片方向($2V$ 小于 80°)

(2)测定光性符号

如前所述,二轴晶矿物的光性符号是根据 Bxa 究竟是 N_g 或是 N_p 确定的。当 $Bxa=N_g$ 时为正光性;$Bxa=N_p$ 时为负光性。因此,测定二轴晶的光性正负,实际上是测定 Bxa 是 N_g 或是 N_p。

测定光性符号时,最好使光轴面与 AA、PP 成 45°夹角,此时干涉图呈对称的两个弯曲黑带(图 4.5.23(b)、(e)),视域中心为 Bxa 出露点,弯曲黑带顶点为光轴出露点,其连线为光轴面与薄片相交的迹线,通过 Bxa 出露点垂直光轴面的方向为 N_m 方向。在光轴面迹线上,两个弯曲黑带顶点(光轴出露点)内外的光率体椭圆半径方位,因光性正负而不同(图 4.5.30、图 4.5.31、图 4.5.32)。图 4.5.30 为二轴负光性晶体垂直 Bxa 切片的立体图,图 4.5.31 及图 4.5.32 左上为平面图,其右下为沿光轴面的剖面图。

在垂直 Bxa 的矿片中,Bxa 垂直薄片平面。锥形偏光中,中央一条光波是沿 Bxa 方向入射,如为负光性晶体,即是沿 N_p 方向入射(图 4.5.30 及图 4.5.31 右下的光轴面剖面图)。垂直此入射光波的光率体椭圆切面为 N_g、N_m 主轴面,其长短半径分别为 N_g 与 N_m(图 4.5.30 上中心及图 4.5.31 左上平面图中心 Bxa 出露点上的椭圆切面)。锥形偏光中其他方向的光

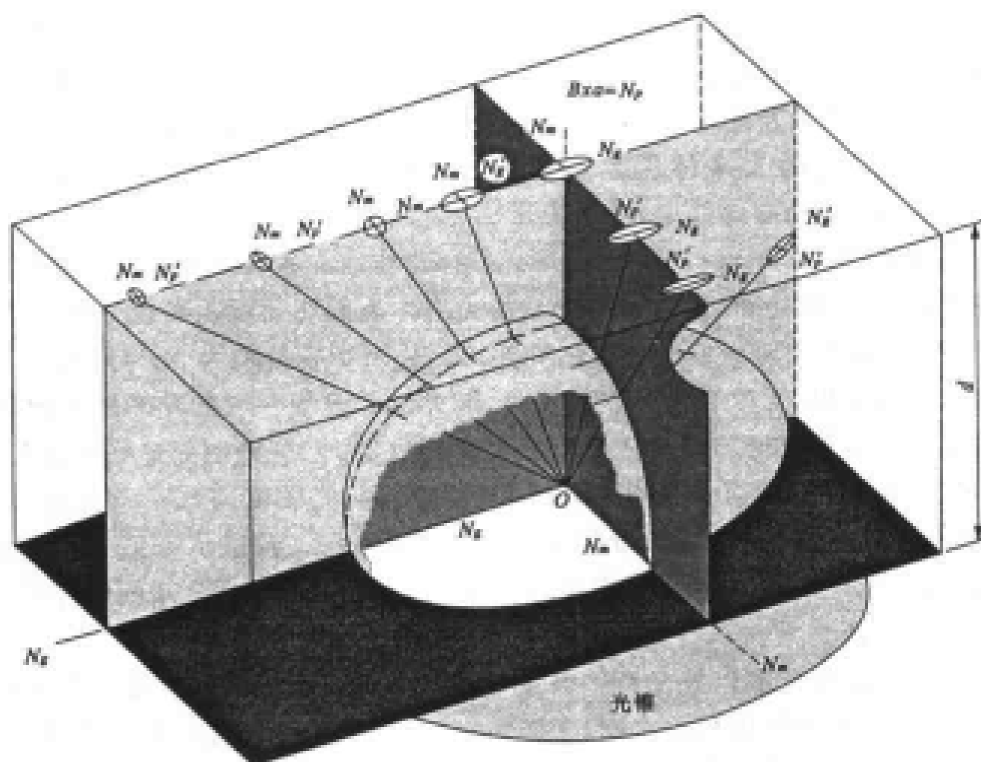


图 4.5.30　二轴晶负光性晶体垂直 Bxa 切片上，光轴面及 N_m 方向上光率体椭圆半径分布立体图
（据 F. D. Bloss, 1961, 修改）

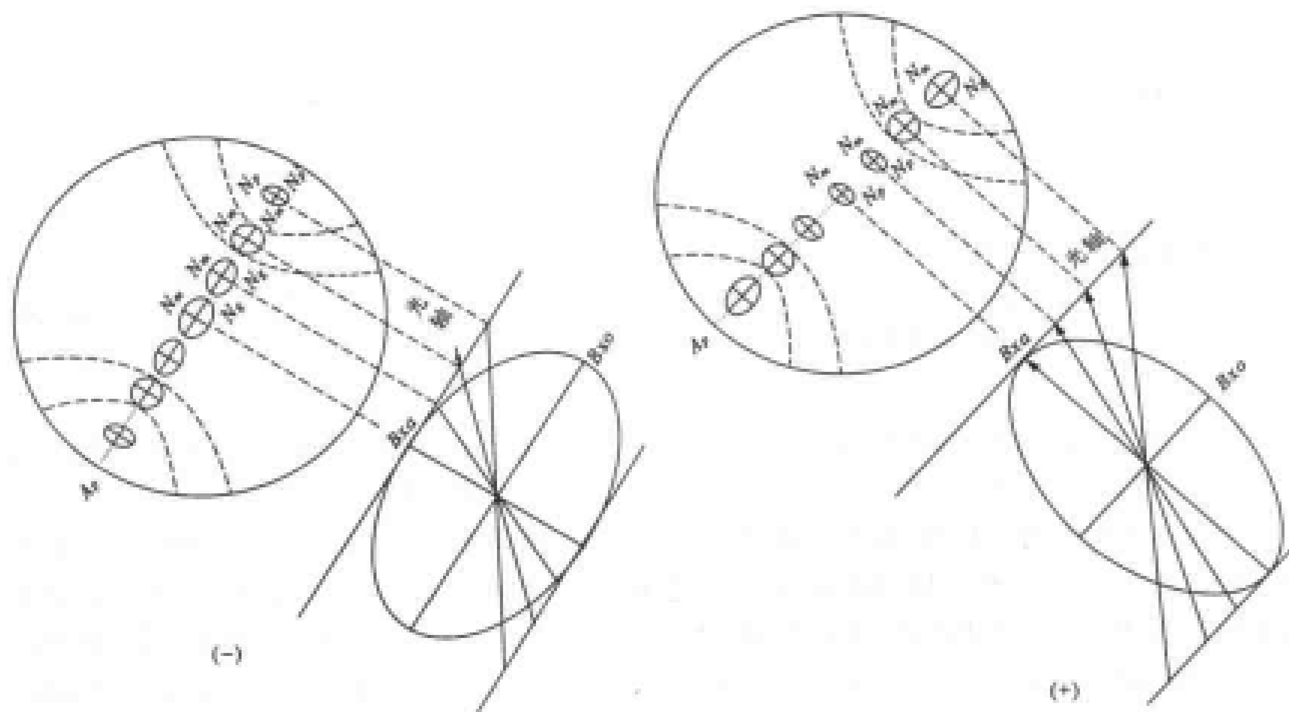


图 4.5.31　二轴晶负光性晶体，垂直 Bxa 切片干涉图中，光轴面与薄片平面交线上，光率体椭圆长短半径的分布方位

图 4.5.32　二轴晶正光性晶体，垂直 Bxa 干涉图中，光轴面与薄片平面交线上，光率体椭圆长短半径的分布方位

波，都是斜交 Bxa 方向入射。在光轴面迹线上的 Bxa 与光轴之间，垂直入射光波的光率体椭

圆切面长短半径分别为 N_g' 和 N_m（图 4.5.30 上部及图 4.5.31 左上平面图中光轴面迹线上，Bxa 出露点与光轴出露点之间的椭圆切面）。垂直沿光轴入射光波的光率体切面为圆切面，其半径等于 N_m（图 4.5.30 及图 4.5.31 左上平面图中弯曲黑带顶点上的圆切面）。在光轴与 Bxo 之间，垂直入射光波的光率体椭圆切面长短半径分别为 N_m 和 N_p'（图 4.5.30 及图 4.5.31 左上平面图中，光轴面迹线上，弯曲黑带凹方的椭圆切面）。

如为正光性晶体（图 4.5.32），垂直沿 Bxa 入射光波的光率体椭圆切面长短半径分别为 N_m 和 N_p。在 Bxa 与光轴之间，垂直入射光波的光率体椭圆切面长短半径分别为 N_m 与 N_p'。在光轴与 Bxo 之间，垂直入射光波的光率体椭圆切面长短半径分别为 N_g' 与 N_m。

由上述情况可以看出，无论光性是正或是负，与光轴面迹线一致的光率体椭圆切面的半径长短在弯曲黑带顶点内外恰恰相反。两个弯曲黑带顶点之间，与光轴面迹线一致的是 Bxo 的投影方向（图 4.5.33）；在弯曲黑带顶点之外（即其凹方），与光轴面迹线一致的是 Bxa 的投影方向；垂直光轴面迹线的方向，弯曲黑带顶点的内外都是 N_m。知道了干涉图上 Bxa、Bxo 及 N_m 的方位之后，加入试板，根据弯曲黑带顶点内外（即凸方与凹方）干涉色级序的升降变化，就能确定 Bxa 是 N_g 还是 N_p，即解决了二轴晶光性正负。

当干涉图中弯曲黑带范围以外仅具一级灰干涉色时，加入石膏试板（图 4.5.34(*a*)），弯曲黑带变为一级红，两个弯曲黑带顶点之间，干涉色由一级灰变为二级蓝，干涉色级序升高，同名半径平行，证明 $Bxo=N_p$；弯曲黑带的凹方，干涉色由一级灰变为一级黄，干涉色降低，异名半径平行，证明 $Bxa=N_g$，故为正光性。图 4.5.34(*b*)中，干涉色级序升降情况与图 4.5.34(*a*)相反，证明 $Bxa=N_p$，$Bxo=N_g$，为负光性。

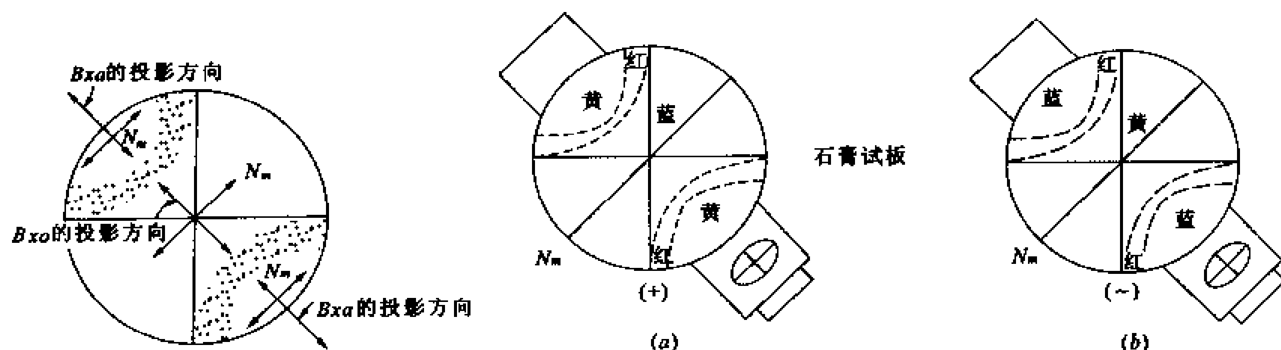


图 4.5.33 垂直 Bxa 切片的干涉图中，Bxa 与 Bxo 的投影方向

图 4.5.34 垂直 Bxa 切片干涉图，弯曲黑带以外仅见一级灰干涉色，加入石膏试板后，干涉图变化情况

干涉色色圈多的干涉图，加入云母试板后（图 4.5.35(*a*)），弯曲黑带变为一级灰白，两弯曲黑带顶点之间，干涉色色圈向内移动，干涉色级序升高，同名半径平行，证明 $Bxo=N_p$；弯曲黑带凹方出现两个黑色小团团，干涉色圈向外移动，干涉色级序降低，异名半径平行，证明 $Bxa=N_g$，为正光性。图 4.5.35(*b*)中干涉色升降变化与图 4.5.35(*a*)相反，证明 $Bxa=N_p$，$Bxo=N_g$，为负光性。

当干涉色色圈较多时，加入石膏试板后，干涉色降低时，原为一级灰的部位变为一级黄，第一个红色色圈变为黑色圈；干涉色升高时，原为一级灰的部位变为二级蓝，其他色圈基本不变。

当 $2V$ 较大时，垂直 Bxa 干涉图与垂直 Bxo 干涉图不易区别，不宜用于测定光性符号。

(3)测定光轴角大小

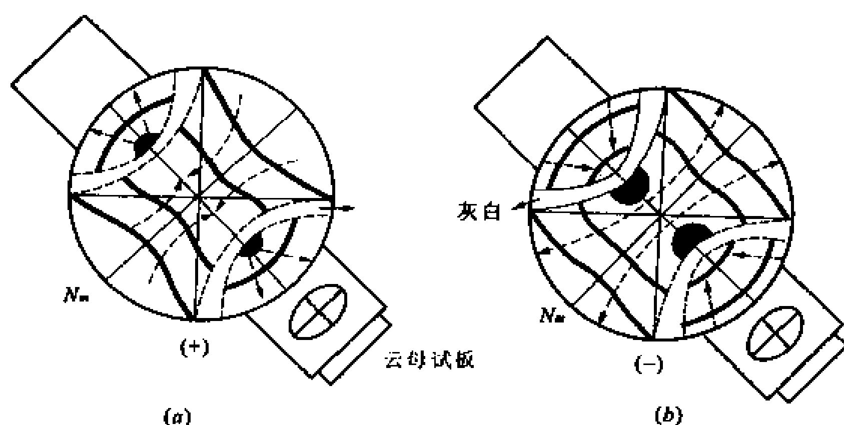


图 4.5.35　二轴晶⊥Bxa 干涉图，干涉色色圈多，加入云母试板后的变化情况

①马拉尔法

在垂直 Bxa 切片的干涉图中，当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时，两个弯曲黑带顶点（光轴点）之间的距离与光轴角大小成正比（图 4.5.36）。二弯曲黑带顶点间距离以 $2D$ 表示，可用目镜分度尺测得。$2D$ 与 $2E$（视光轴角）之间的关系为：

$$D=K\cdot\sin E$$

式中 K 为一常数（称马拉尔常数），取决于显微镜的透镜系统，不同的透镜系统有不同的 K 值，在实际工作中，用已知矿物先测定显微镜的 K 值。

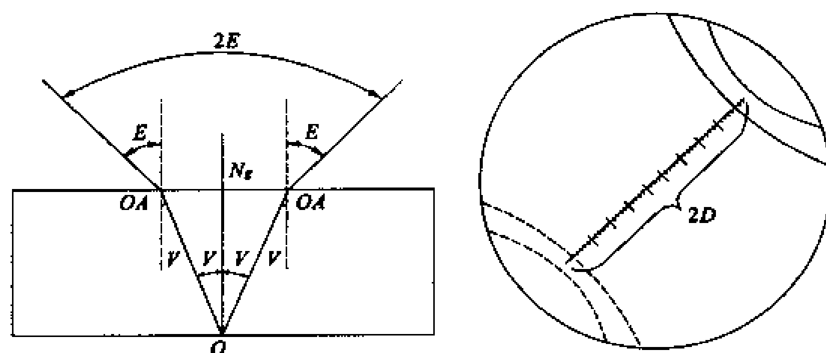


图 4.5.36　利用垂直 Bxa 切片干涉图测定 $2V$ 的原理

视光轴角 $2E$ 与 $2V$ 的关系为：

$$\sin E = N_m\cdot\sin V\quad（按折射定律\frac{\sin E}{\sin V}=N_m）$$

因此

$$D = K\cdot N_m\cdot\sin V\cdot\sin V = \frac{D}{K\cdot N_m}$$

如果在薄片与物镜之间，用浸油代替空气，上式可改写为：

$$\sin E = \frac{N_m}{N}\cdot\sin V\quad\left(N\text{ 代表浸油折射率},\frac{\sin E}{\sin V}=\frac{N_m}{N}\right)$$

$$D = K\cdot\frac{N_m}{N}\cdot\sin V\qquad\qquad \sin V = \frac{D\cdot N}{K\cdot N_m}$$

此方法测定的 $2V$ 误差约为 5°～8°。也可根据 $2D$、K 及 N_m 值在专门图解中查 $2V$ 值。$2V$ 较大，弯曲黑带顶点不在视域内时不适用。

②托毕法

托毕(1956)在以上方法的基础上提出，根据两光轴出露点距离(2D)与干涉图视域直径(2R)的比值测定2V大小(图4.5.37)。其方法如下：

根据上述方法，2D与2V的关系为：

$$D = K \cdot N_m \cdot \sin V \cdots \quad (1)$$

干涉图视域直径(2R)大小与物镜光孔角(2θ)成正比。以N代表物镜与薄片间介质(空气或浸油)的折射率，得下式：

$$R = K \cdot N \cdot \sin\theta$$

物镜的数值孔径(N.A.)为：

$$N.A. = N \cdot \sin\theta$$

因此

$$R = K \cdot N.A. \cdots \quad (2)$$

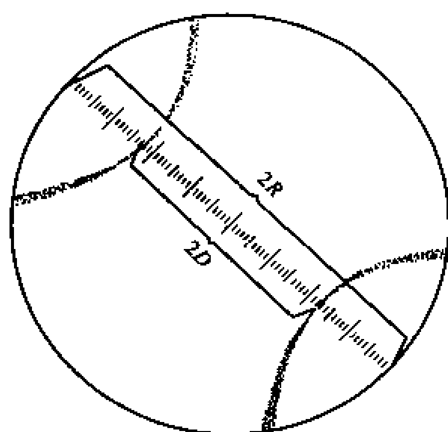


图 4.5.37　2D与2R值示意图

将(1)和(2)式各乘以2之后，再相比即得：

$$\frac{2D}{2R} = \frac{2K \cdot N_m \cdot \sin V}{2K \cdot N.A.} = \frac{N_m \cdot \sin V}{N.A.}$$

式中2D与2R可用目镜分度尺在干涉图中直接测出(图4.5.37)，N.A.在每个物镜上都已标出，N_m值可以测定或利用矿物突起等级估计。用这些数值代入上式即可计算出V值，乘以2即得2V。也可以在专门图解中查2E及2V值。这个图解只适用于物镜的数值孔径(N.A.)为0.85。如果所用物镜的N.A.不是0.85，则必须将$\frac{2D}{2R}$乘以$\frac{\text{所用物镜的}N.A.}{0.85}$之后再查有关图解。

这个方法的优点是不需测定马拉尔常数，直接用物镜的N.A.计算2V，其精度通常在5°左右。当2V较大，弯曲黑带顶点不在视域内时，此方法不适用。

5.3.2　垂直一个光轴切片的干涉图

1. 图像特点(图4.5.38)

二轴晶垂直一个光轴切片的干涉图，在形象特点上相当于垂直Bxa干涉图的一半，其光轴出露点位于视域中心。当光轴面与上、下偏光镜振动方向之一平行时，出现一个直的黑带(图4.5.38(a))及卵形干涉色色圈(双折射率较大或薄片较厚时)。转动载物台，黑带弯曲，当光轴面与上、下偏光镜振动方向成45°夹角时，黑带弯曲度最大(图4.5.38(b))。弯曲黑带顶点为光轴出露点，位于视域中心。弯曲黑带凸向Bxa出露点。继续转动载物台，弯曲黑带逐渐变直，至90°时又成为一个直的黑带，但方向已改变(图4.5.38(c))。再继续转动载物台，黑带再度弯曲，至135°时黑带弯曲度最大，但其凸出方向已改变(图4.5.38(d))，其顶点仍位于视域中心。

2. 垂直一个光轴切片干涉图的应用

①确定轴性及切片方向

②测定光性符号

光轴面与上、下偏光镜振动方向成45°夹角时，弯曲黑带顶点凸向Bxa出露点，找出Bxa出露点及另一弯曲黑带在视域外的方位之后，按垂直Bxa切片干涉图的方法测定光性符号

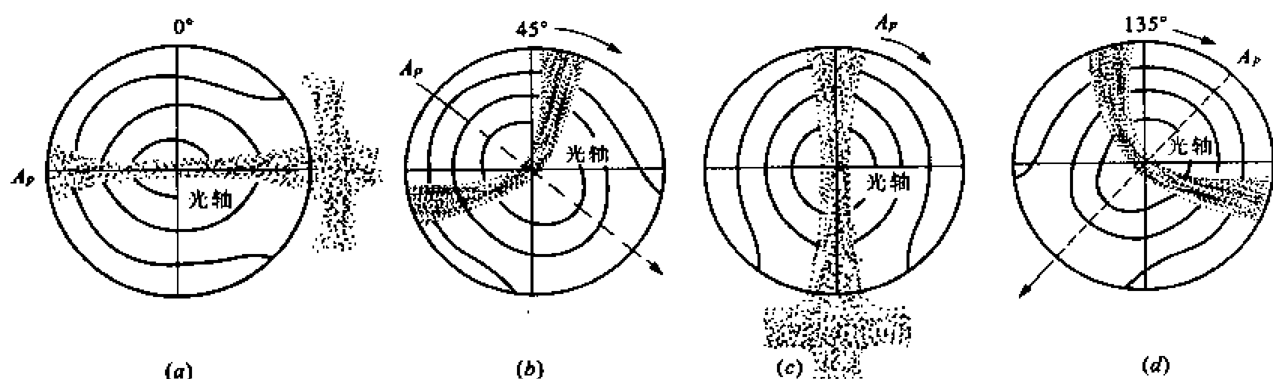


图 4.5.38　二轴晶垂直一个光轴的干涉图

(图 4.5.39 及图 4.5.40)。

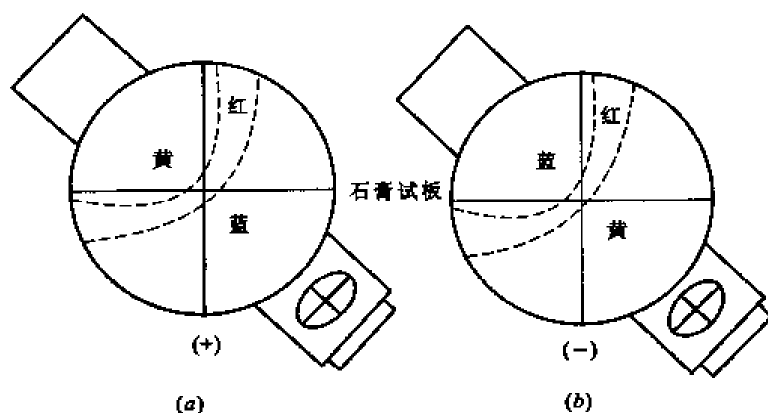


图 4.5.39　垂直一个光轴切片的干涉图，黑带以外仅见一级灰干涉色，加入石膏试板后，干涉色变化情况

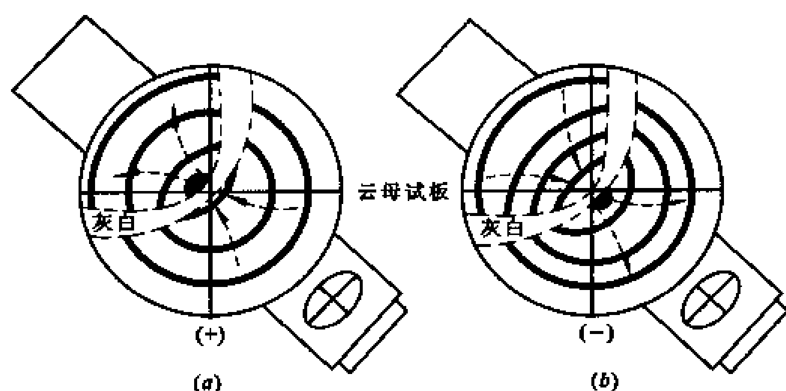


图 4.5.40　垂直一个光轴切片的干涉图，色圈较多，加入云母试板后，干涉色变化情况

③估计光轴角大小

在垂直一个光轴切片干涉图中，当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时，黑带弯曲程度与光轴角大小成反比(图 4.5.41)。光轴角愈大，黑带愈直。当 $2V=90°$ 时，黑带成直带；当 $2V=0°$ 时，黑带弯曲成 90°(相当于一个轴晶)；$2V$ 介于 0 与 90°之间时，黑带弯曲度介于 90°与直带之间。用这种方法估计的光轴角不太精确。

文契尔绘制了新的 $2V$ 鉴定图(图 4.5.42)，图中标有物镜的数值孔径($N.A.$)及不同 N_m

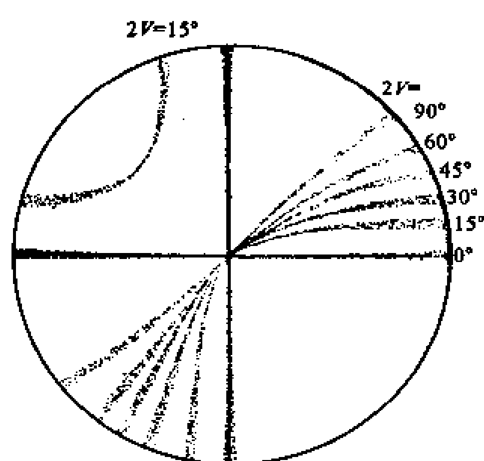


图 4.5.41　垂直光轴切片干涉图中，根据黑带弯曲度估计 2V
（据莱特）

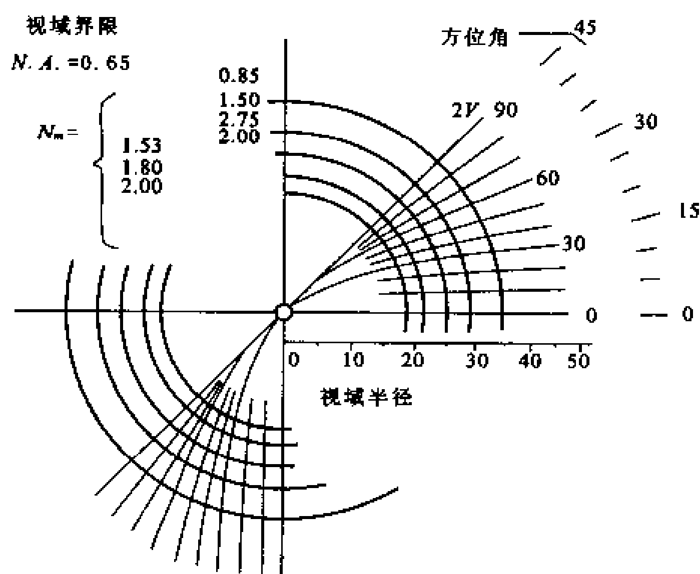


图 4.5.42　垂直一个光轴切片干涉图的 2V 鉴定图
（据文契尔）

值所对应的视域界限，有助于较准确地判断黑带的弯曲度，从而得出光轴角的大小。其中所标的干涉图视域半径度数是指射到视域边缘的光线与显微镜物镜中轴之间夹角（即物镜光孔角的二分之一）。在图的右上方还注明了 2V 值及相应的弧度方位角。

5.3.3　斜交光轴切片的干涉图

1. 图像特点（图 4.5.43、图 4.5.44、图 4.5.45）

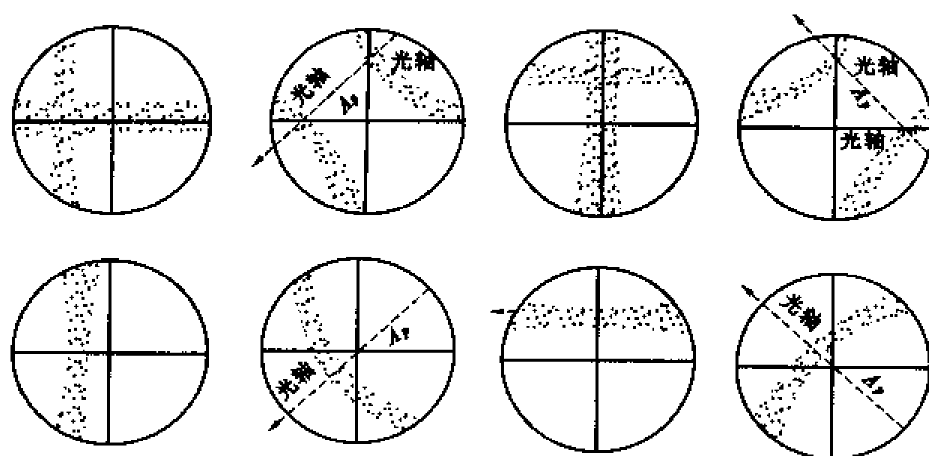


图 4.5.43　二轴晶斜交 Bxa 切片（上）和斜交光轴（下）切片的干涉图

不垂直光轴，也不垂直 Bxa，但较接近于它们的斜交切片，属斜交光轴的切片。这种切片的干涉图，在图像特点上，相当于垂直 Bxa 切片干涉图的一部分。其黑带与干涉色色图都不完整。转动载物台，黑带弯曲移过视域，在 45°位置时，弯曲黑带顶点不在视域中心。斜交光轴切片的干涉图可以分为两种类型。一种类型是垂直光轴面的斜交光轴切片干涉图（图 4.5.44）。其特点是当光轴面与上、下偏光镜振动方向之一平行时，黑带通过视域中心而且平

分视域的一个直带(图 4.5.44(*a*)、(*c*)、(*e*)、(*g*))。转动载物台,黑带弯曲,当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时,弯曲黑带顶点不在视域中心。当光轴倾角不大时,弯曲黑带顶点仍位于视域之内(图 4.5.44(*b*)、(*d*));如果光轴倾角较大,则弯曲黑带顶点在视域之外(图 4.5.44(*f*)、(*h*))。另一种类型是与光轴面及光轴都斜交的切片(图 4.5.45)。当光轴面与上、下偏光镜振动方向之一平行时,直的黑带不通过视域中心而偏在视域的一侧(图 4.5.45(*a*)、(*c*)、(*e*)、(*g*))。转动载物台,黑带弯曲,当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时,弯曲黑带顶点不在视域中心。光轴倾斜不大时,弯曲黑带顶点仍在视域内(图 4.5.45(*b*)、(*c*));光轴倾斜较大时,弯曲黑带顶点在视域之外(图 4.5.45(*f*)、(*h*))。

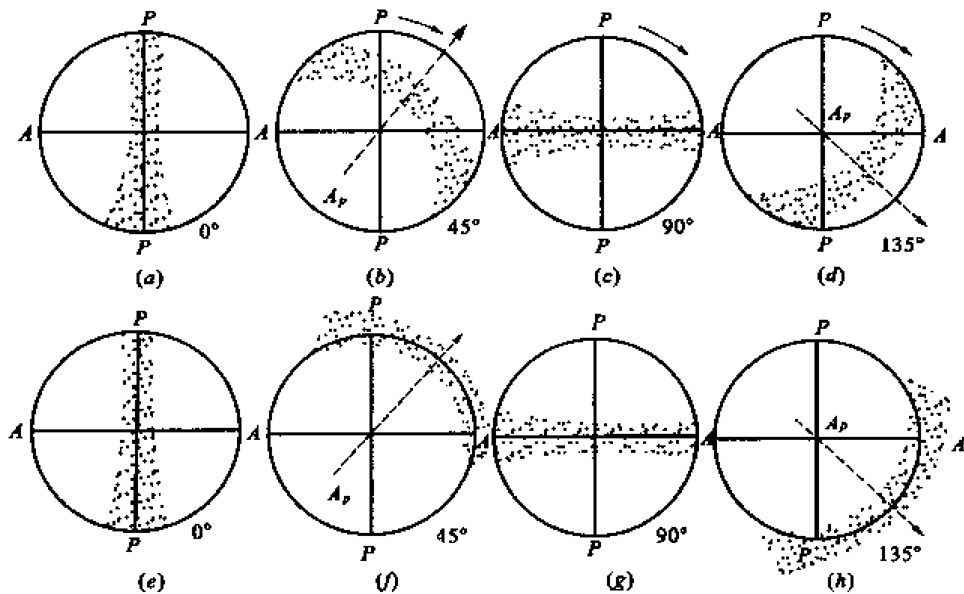


图 4.5.44 垂直光轴面的斜交光轴切片干涉图

(箭头指向 *Bxa* 出露点)

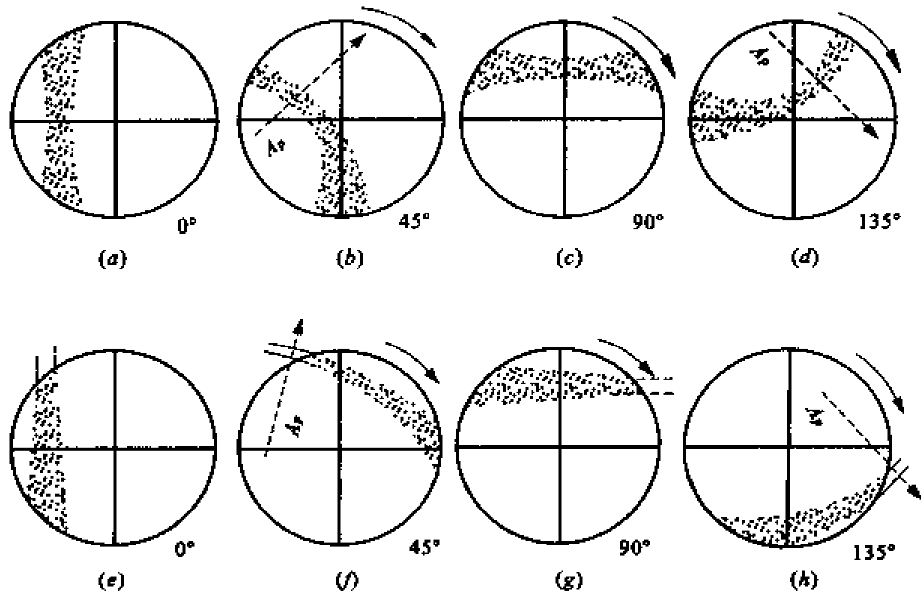


图 4.5.45 斜交光轴面的斜交光轴切片干涉图

(箭头指向 *Bxa* 出露点)

2. 斜交光轴切片干涉图的应用

①确定轴性及切片方向

②测定光性符号

斜交光轴切片干涉图，可视为垂直 Bxa 切片干涉图的一部分。转动物台，根据黑带弯曲移动情况，找出弯曲黑带顶点的凸方及 Bxa 在视域外的方位之后，即可按垂直 Bxa 切片干涉图的方法测定光性符号。

一般鉴定工作时，斜交光轴切片的干涉图较常见，因此必须熟练掌握弯曲黑带移动变化规律。

5.3.4 垂直钝角等分线(Bxo)切片的干涉图

1. 图像特点(图 4.5.46)

当光轴面与上、下偏光镜振动方向之一平行时，为一个较粗大模糊的黑十字(图 4.5.46(*a*))，黑十字四个象限仅出现一级灰干涉色，如果矿物的双折射率较大时，可出现稀疏的干涉色色圈。如果把视域想象地扩大，其干涉图的形象特点与垂直 Bxa 切片干涉图相似，所不同的是两个光轴出露点间的距离较远，视域中所看到的只是干涉图的中央部分，所以黑十字显得粗大而模糊，干涉色圈不太明显。

转动载物台，黑十字迅速分裂成两个弯曲黑带(图 4.5.46(*b*))，沿光轴面方向逸出视域(转角一般为 10°～35°)。当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 40°夹角时，视域内最亮，弯曲黑带顶点间距离最远，并都在视域之外(图 4.5.46(*c*))，其顶点仍为光轴出露点。继续转动载物台，弯曲黑带逐渐靠近，至 90°时又出现一个粗大模糊的黑十字。再转载物台，黑十字又分裂。

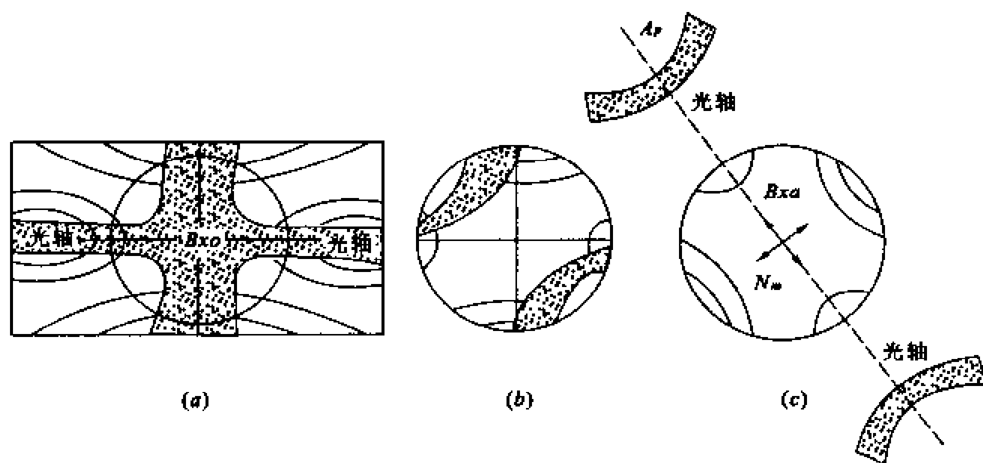


图 4.5.46 二轴晶垂直 Bxo 切片的干涉图

2. 成因

从垂直 Bxo 切片的波向图中可看出(图 4.5.47)，当光轴面与上、下偏光镜振动方向之一平行时，有比较多的光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行，故消光或近于消光而构成粗大的黑十字。稍转载物台，大多数光率体椭圆半径与 AA、PP 斜交，而且中心部分首先斜交，故黑十字迅速分裂并退出视域。

当矿物的 $2V$ 很大时，两个光轴间的钝角与锐角大小相近，垂直 Bxo 切片的干涉图与垂直 Bxa 切片的干涉图不易区分。当矿物的 $2V$ 很小时，两个光轴间的钝角很大，垂直 Bxo 切片的

干涉图中两个光轴出露点之间的距离很长。转动载物台时，黑十字分裂退出视域的速度快（即逸出角小），此时垂直 Bxo 切片干涉图又难于与平行光轴面切片的干涉图区别。但利用前述的逸出角法，能够区分这三种切片的干涉图。

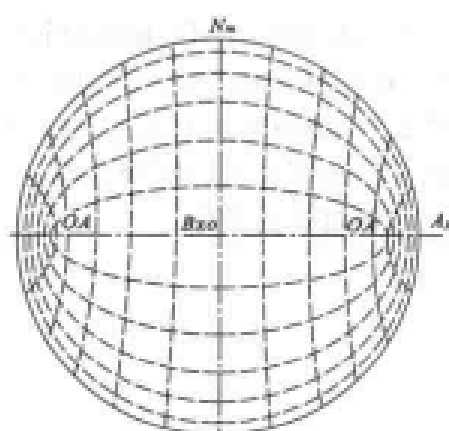


图 4.5.47 垂直 Bxo 切片的波向图（$2V=60°$）

用逸出角法确定属于垂直 Bxo 切片干涉图后，也可用它确定矿物的切片方向及测定光性符号。当光轴面与上、下偏光镜振动方向成 45°夹角时，视域中心为 Bxo 出露点（图 4.5.46(c)），在弯曲黑带之间与光轴面迹线一致的是 Bxa 的投影方向，垂直光轴面迹线的方向为 N_m。加人试板，根据视域内干涉色的升降变化亦可确定光性正负。一般不用这种切片测定光性符号。应当注意：在这种切片的干涉图中，Bxa 与 Bxo 的投影方向与垂直 Bxa 切片的干涉图中的位置恰好互换，其干涉色级序升降变化与垂直 Bxa 切片干涉图的干涉色升降变化恰好相反。

5.3.5 平行光轴面切片的干涉图

1. 图像特点（图 4.5.48）

其图像特点与一轴晶平行光轴切片的干涉图相似。当 Bxa 和 Bxo 方向分别平行 AA、PP 时，为一个粗大模糊的黑十字，几乎占据整个视域（图 4.5.48(a)）。转动载物台，黑十字分裂并迅速沿 Bxa 方向退出视域（一般转角为 12°～17°），亦称瞬变干涉图或闪图。当 Bxa 与 AA、PP 成 45°夹角时，视域最亮；如果矿片的双折射率较大或薄片较厚时，亦能看到对称的弧形干涉色色带。在 Bxa 方向的两个象限内，干涉色级序较低；在 Bxo 方向的两个象限内，干涉色与中央近于相同或稍高（图 4.5.48(b)）。

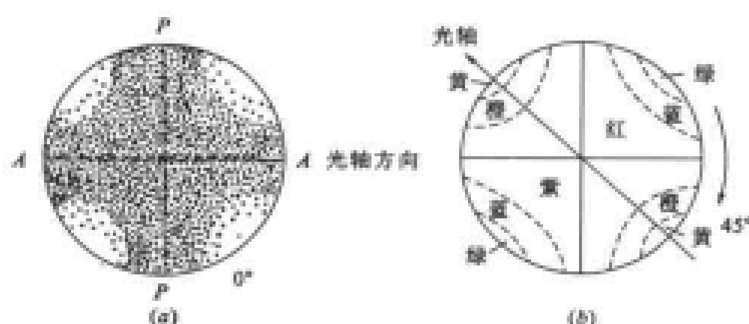


图 4.5.48 二轴晶平行光轴面切片的干涉图

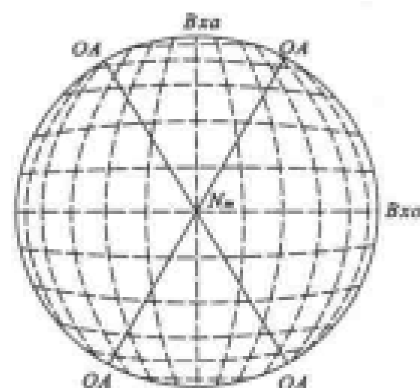


图 4.5.49 二轴晶平行光轴面切片的波向图（$2V=60°$）

2. 成因

从平行光轴面切片的波向图中（图 4.5.49）可看出，当 Bxa、Bxo 分别与 AA、PP 平行时，几乎所有的光率体椭圆半径与 AA、PP 平行或近于平行，故消光或近于消光而形成粗大模糊的黑十字。稍转载物台，几乎所有的光率体椭圆半径都与 AA、PP 斜交，而且中央部分首先斜交，故黑十字从中心分裂并迅速退出视域，整个视域明亮。

这种切片的干涉图不能确定轴性(因与一轴晶平行光轴切片干涉图无法区别),但当轴性已知时,则可用其确定切片方向并可测定光性符号。根据黑带退出视域方向或视域最亮时干涉色较低,二象限联线方向为 Bxa 方向,找出 Bxa 在干涉图中的方位后,加入试板,根据整个视域内干涉色级序的升降变化确定 Bxa 是 N_g 或是 N_p 之后,即确定了光性正负。一般不用这种切片测定光性符号。

6 透明矿物薄片的系统鉴定

偏光显微镜下对透明矿物薄片进行系统的光学性质测定，通常用于鉴定未知矿物或已知矿物的精确定名。

透明矿物薄片的系统鉴定，必须配合手标本观察。在系统测定光学性质之前，首先要观察矿物手标本的晶形、颜色、光泽、硬度、条痕、解理、断口、次生变化及共生组合等，并需了解矿物的野外产状。如果经过系统鉴定之后，仍不能准确定出矿物名称，还需配合其他方法，作进一步鉴定。

6.1 透明矿物薄片系统鉴定的内容

1. 单偏光镜下的观察

晶形　观察晶体的完整程度，结晶习性。根据各方向切面形态，初步判断晶体形状及可能属于哪一个晶系。

解理　观察解理的完全程度，根据不同方向切面上的解理，判断解理的组数。如为两组解理，需要测定解理夹角，尽可能确定解理与结晶轴之间的关系。

突起　观察矿片的边缘、糙面及突起明显程度，结合贝克线移动规律确定其突起等级，估计矿物折射率的大致范围。

颜色、多色性　观察矿片有无颜色，如有颜色，则观察有无多色性，多色性变化情况，并在定向切片上测定多色性公式及吸收公式。

此外，还应观察有无包裹体，其排列与分布情况；有无次生变化，其变化程度及变化产物。

2. 正交偏光镜下的观察

干涉色　观察矿片的最高干涉色级序，在平行光轴或光轴面切片上详细测定干涉色级序，有无异常干涉色，其特点如何。

测定双折射率　根据矿片的最高干涉色级序（定光程差）、薄片厚度，确定双折射率值。

消光类型　根据不同方向切片上的消光情况，确定矿物的消光类型。

测定消光角　对斜消光的矿物，在定向切片上测定消光角。

测定延性符号　对一向延长的矿物，测定其延长方向的光率体椭圆半径名称，确定延性符号。

双晶　观察矿物有无双晶，确定双晶类型。

3. 锥光镜下的观察

根据有无干涉图区分均质体与非均质体。根据干涉图特征确定轴性（区分一轴晶与二轴晶）、切片方向。测定光性符号、光轴角大小。观察色散类型、强弱及紫光与红光光轴角的相对大小。

6.2 定向切片的选择及其特征

上述光学性质中，如多色性公式、干涉色级序、双折射率大小、消光角大小及光轴角大小等，通常都需要在定向切片上测定。常用的定向切片有垂直光轴切片及平行光轴（或光轴面）切片，其特征如下：

1. 垂直光轴切片

光率体切面为圆切面，其半径等于 N_o（或 N_m）。单偏光镜下不显多色性（如为具多色性矿物）；正交偏光镜下全消光（有时呈暗灰色，但转动载物台其明暗变化不显明）；锥光镜下显垂直光轴切片干涉图（一轴晶或二轴晶）。在这种切片上可以测定下列光学性质：

①测定 N_o（一轴晶）或 N_m（二轴晶）的颜色及主折射率 N_o 或 N_m 值。

②确定轴性（区分一轴晶和二轴晶），测定光性符号。

③估计（或测定）$2V$ 大小，观察色散现象。

在岩石薄片中往往不易找到严格垂直光轴的切片。一轴晶矿物可以用光轴倾角不大、近于垂直光轴的切片代替。这种切片的光率体椭圆半径为 N_e' 与 N_o，其多色性较弱，干涉色较低，干涉图中黑十字交点虽不在视域中心，但仍在视域内。二轴晶矿物可用垂直光轴面的斜交光轴切片代替（最好是光轴倾角不大），这种切片的光率体椭圆半径中总有一个半径是 N_m，即其椭圆半径为 N_m 与 N_g'或 N_p'。其多色性较弱，干涉色较低。当光轴面与 PP、AA 之一平行时，直的黑带平分视域，此时垂直黑带的方向为 N_m 方向。

2. 平行光轴（一轴晶）或光轴面（二轴晶）切片

光率体椭圆切面半径为 N_e 与 N_o 或 N_g 与 N_p，多色性最明显（具多色性矿物），干涉色级序最高，显瞬变干涉图。在这种切片上可测定下列光学性质：

①观察多色性的明显程度，测定 N_e 与 N_o（一轴晶）或 N_g 与 N_p 的颜色（二轴晶）。

②观察闪突起现象，测定主折射率值 N_e 与 N_o 或 N_g 与 N_p（二轴晶）。

③测定最高干涉色级序及最大双折射率值。

④测定消光角（适用于单斜晶系，N_m 与 Y 晶轴一致的矿物）。

6.3 透明矿物薄片系统鉴定的程序

1. 区分均质体与非均质体矿物

均质体矿物各方向切片在正交偏光镜间均为全消光，在锥光镜下无干涉图。非均质体矿物，只有垂直光轴切片在正交偏光镜下全消光，其他方向切片在正交偏光镜下出现四次消光，四次明亮，如用白光照射会产生干涉色。非均质体矿片在锥光镜下产生各种类型的干涉图。

2. 均质体的鉴定

在单偏光镜下观察晶形、解理、颜色及突起等级，包裹体特征、次生变化等特征。

3. 非均质体的鉴定

通常采用下列程序：

①在单偏光镜下观察晶形、解理、测定解理夹角、颜色、突起等级、包裹体特征等。在正交偏光镜下观察消光类型，如为平行消光，测定延性符号，观察双晶类型等。

②选择一个垂直光轴的矿片，在锥光镜下，根据干涉图特征确定轴性，测定光性符号。如为二轴晶，估计 2V 大小，观察色散特征。如为有色矿物，用这种切片在单偏光镜下观察 N_o 或 N_m 的颜色。

如果薄片中找不到垂直光轴的切片，一轴晶可选一个光轴倾角不大的斜交光轴切片测定上述光学性质。利用这种切片观察 N_o 颜色时，应先在正交偏光镜下确定 N_o 的方向，并使 N_o 平行 PP（此时矿片消光）后，推出上偏光镜，观察 N_o 的颜色。二轴晶可以选一个垂直光轴面的斜交光轴切片（光轴倾角不大）测定上述光学性质。利用这种切片测定 N_m 的颜色时，必须先确定 N_m 的方向。该切片干涉图的特征是当光轴面与 AA 或 PP 平行时，直的黑带通过视域中心并平分视域，此时垂直该直黑带的方向即 N_m 方向。使 N_m 平行 PP，去掉锥光装置，在单偏光镜下观察 N_m 的颜色。如果不需要观察 N_m 的颜色（如无色矿物），则选择一个光轴倾角不大的任意斜交光轴的切片即能代表垂直光轴切片。

③如为一轴晶矿物，选择一个平行光轴的切片。在正交偏光镜下测定最高干涉色级序、最大双折射率值。如为有色矿物，使 N_e 平行 PP，在单偏光镜下观察 N_e 的颜色；转动载物台 90°，使 N_o 平行 PP，观察 N_o 的颜色。同时观察多色性明显程度、吸收性，并写出多色性公式及吸收性公式。观察闪突起现象。

④如为二轴晶矿物，选择一个平行光轴面的切片。在正交偏光镜下测定最高干涉色级序，最大双折射率值，消光角大小（单斜晶系，$N_m // Y$ 轴时），确定 N_g 与 N_p 的方向。如为有色矿物，使 N_g 平行 PP，在单偏光镜下观察 N_g 的颜色；转动载物台 90°，使 N_p 平行 PP，观察 N_p 的颜色。同时观察多色性明显程度、吸收性及闪突起现象。结合垂直光轴切片上观察的 N_m 颜色，写出多色性公式及吸收性公式。

岩石薄片中，只能根据突起等级大致估计矿物的折射率范围。精确测定矿物的主折射率值，需用油浸法（下一章介绍）。

系统测定光学性质之后，查阅有关光性矿物鉴定手册或鉴定图表，定出矿物名称。

7 油浸法简介

折射率值是透明矿物的重要光学常数，精确测定矿物的折射率值，有助于准确鉴定矿物及固溶体矿物的端员组分。测定透明矿物折射率最常用的方法是油浸法。

油浸法是将矿物碎屑浸没在已知折射率的介质中，比较二者的折射率值，通过不断更换不同折射率介质，以测定矿物的折射率值。常用的浸没介质是液体介质，称为浸油。少数折射率特别高的矿物，液体浸油达不到要求，需用固体介质。测定时将固体介质熔融后与矿物碎屑粘合，比较二者的折射率值。

油浸法的优点是：简便、迅速、准确，而且使用的样品数量较少。

7.1 浸油的配制及测定浸油折射率的方法

7.1.1 浸油的配制

根据拉申的统计，自然界已知折射率的1700种矿物中，折射率值在1.475～1.700之间的矿物约54%，多为一般造岩矿物；折射率值大于1.700的矿物约45%（其中大于2.700的矿物仅2%左右），多为暗色矿物及重矿物；折射率小于1.400的矿物约1%，主要为盐类矿物。

测定矿物的折射率值，通常利用配制成套的浸油。在一套浸油中，相邻浸油折射率的差值一般在0.01～0.03之间。在一般条件下，油浸法测定精度不超过0.002，所以普通油浸法中，浸油的间隔不宜小于0.002。在1.400～1.700折射率范围内的浸油，相邻浸油的间隔通常采用0.003，约有100瓶，一般称为“低折射率浸油”；在1.700～2.100折射率范围内的浸油，相邻浸油的间隔多采用0.01或0.05，通常称为“高折射率浸油”。

表4.7.1 各种浸油折射率值

混合方法	浸 油 原 料	折射率范围	备 注
液体与液体混合	煤油分馏物	1.350～1.450	
	煤油分馏物与α氯代萘	1.450～1.630	
	α氯代萘与二碘甲烷	1.630～1.740	
	水与甘油	1.330～1.470	
	α溴代萘与液体石蜡	1.480～1.660	
	α溴代萘与二碘甲烷	1.660～1.740	
固体溶于液体中	硫与二碘甲烷	1.740～1.780	黄磷易自燃，使用时注意
	硫、磷与二碘甲烷	1.740～2.060	
	三硫化二砷与二碘甲烷	1.780～2.070	
固体与固体混熔	胡椒硷—碘化锑—碘化砷	1.660～2.100	
	硫、硒	1.890～2.920	
	铊的卤族元素化合物	2.200～2.900	
	硒与硒化砷	2.170～2.720	

浸油的配制方法主要有三种：液体与液体混合，固体溶于液体中及固体与固体混熔。常用于配制浸油的原料如表 4.7.1。

配制"低折射率浸油"，主要采用不同折射率的液体，按一定比例混合而成。被混合的两种液体的折射率差值最好不超过 0.2，混合后的液体体积不能小于 20 毫升，否则将影响折射率的准确性。

用于配制浸油的液体，最好符合以下要求：

①不与所测矿物及测定所使用器材起化学反应。

②无色或近于无色，而且能彼此均匀混合。

③挥发性不大，而且彼此挥发速度相似，以免使用时其折射率变化大。

④没有剧毒。

配制浸油时可使用以下公式：

$$\begin{cases} N_1V_1 + N_2V_2 = NV \\ V_1 + V_2 = V \end{cases}$$

式中 N_1、N_2 代表用于配制浸油的两种液体的折射率值；N 代表欲配浸油的折射率值；V_1、V_2 代表用于配制浸油的两种液体体积（其折射率已知）；V 代表欲配浸油的体积。按上式求出 V_1、V_2 之后，用两个滴管进行配制。

7.1.2 浸油折射率的测定

配成的浸油，用折射仪检查测定其折射率值，常用的折射仪有以下两种：

1. 阿贝折射仪

根据全反射原理制成，主要测定液体的折射率值，也可以测定固体的折射率。一般的阿贝折射仪能测定 1.300～1.700 范围的折射率，有一种新型的阿贝折射仪能测定 1.86 的折射率值。其基本结构如图 4.7.1。主要部分有双棱镜盒（由两个折射率为 1.700 和 1.86 的光学玻璃三棱镜组成）、棱镜转动轮、望远镜筒（带目镜）、读数镜筒（带目镜）、消色棱镜、反光镜等，并附有标准玻璃块。其测定操作简便，能直接读数，精度可达 0.0004 左右，故使用较为广泛。具有消色差棱镜系统，能得到液体的平均色散，配合单色仪可作出色散曲线。有热水装置，可作出温度变化曲线，从而得到温度系数。

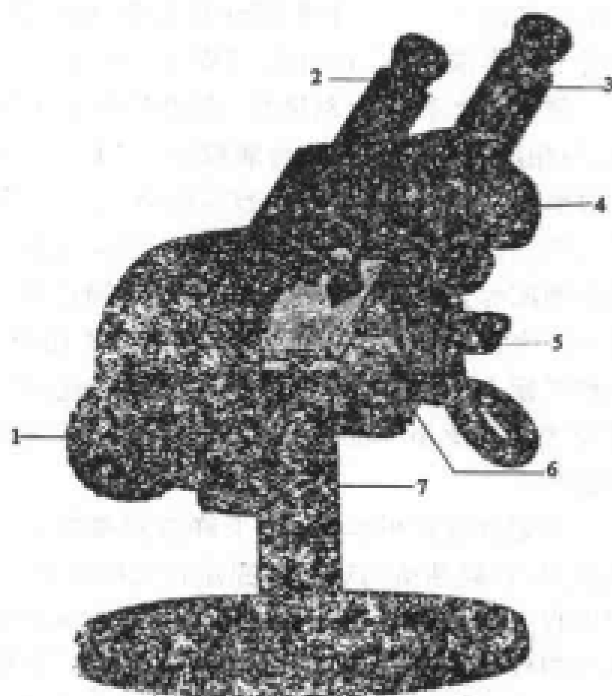


图 4.7.1 阿贝折射仪

1—棱镜转动轮；2—读数镜筒（带目镜）；3—望远镜筒（带目镜）；4—消色棱镜转动轮；5—温度计座；6—双棱镜盒；7—反光镜

测定浸油折射率的操作步骤为：

①将阿贝折射仪正面放置，把双棱镜盒打开，用擦镜头的软纸将玻璃棱镜表面擦干净。将欲测浸油滴在下棱镜上，合上双棱镜并锁紧

棱镜盒手柄。

②调节反光镜，使望远镜筒内视域明亮。转动棱镜盒转动轮，直至望远镜筒内视域中出现明暗的分界线。

③转动消色棱镜轮，消除色散，直至望远镜视域中出现清晰的黑白界线。再转动棱镜转动轮，使黑白界线移至十字丝交点。

④在读数镜筒中，通过读数线读出浸油的折射率值。可直接读至小数点后第三位数，还可估计到小数点后第四位数值。若用白光光源，其读数相当于钠黄光下浸油的折射率值。若所用光源为单色光，则需记录光波的波长。测定完毕之后，必须将棱镜盒上的浸油用软纸和酒精擦洗干净。

新购或长期没有使用的阿贝折射仪，需用其中所附的标准玻璃块（其上刻有折射率值）对折射率刻度进行检查和校正。其校正方法如下：

①打开棱镜盒前方的照明圆孔，把阿贝折射仪放平，打开棱镜盒，使棱镜的一个光面朝上，在其上滴浸油一滴（其折射率必须大于标准玻璃块）后，放上标准玻璃块，并排除其间的气泡。

②转动棱镜盒转动轮，使读数镜中的读数线位于标准玻璃块折射率值上。

③转动消色棱镜轮，使望远镜筒视域中出现清晰的黑白界线。如果黑白界线通过视域的十字丝中心，说明阿贝折射仪正常。如果黑白界线不通过十字丝中心，扭动校正螺丝（在望远镜筒前方），使黑白界线移动至十字丝中心为止。

2. 吉莱折射仪（图 4.7.2）

根据折射原理制成，可以测定油液的折射率值。其基本结构如图 4.7.2。主要部分有支架、横梁及光缝板，并附有若干楔形油槽、滤光器及 15W 的小灯泡。

刻度板上有两个刻度尺，左边是刻有折射率值的对数尺，与相应的楔形油槽配合能测定 1.333～1.920 范围内的折射率值，可直接读数至小数点后第二位，还可估计到小数点后第三位数值。右边是一个毫米尺，与相应的折射率楔形油槽配合，能测定 1.116～2.350 范围内的折射率值。从毫米尺上读出的数值，需要用附表换算相应的折射率值。在刻度板上的 1.52 处有一个人射光狭缝，在狭缝之后，可安装滤光器及小灯泡。刻度板上还有一个刻有读数线的读数滑板。

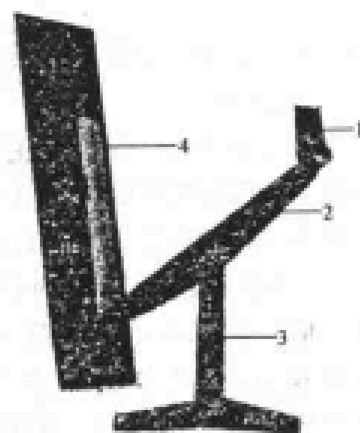


图 4.7.2 吉莱折射仪
1—光缝板，其上附有载楔形油槽的玻璃片；2—横梁；3—支架；4—刻度板，附人射光缝及读数滑板

测定浸油折射率时，将少许欲测浸油滴人相应的楔形油槽后，将载油槽的玻璃片固定在光缝板上。调节其位置，使楔形油槽对准光缝板上的光缝和刻度板上的人射光缝。从人射光狭缝射来的光线，经过光缝板上的光缝至楔形油槽发生折射。从油槽经光缝看过去，在刻度板上出现一个狭缝的折射像，其位置即等于欲测浸油的折射率值。如果所用光源为白光，狭缝折射像分散成一个色谱带，其宽度取决于所测浸油的色散能力。此时，在人射光狭缝后装上滤光器，则在刻度板上出现一个暗色吸收线。移动读数滑板，使其读数线对准此暗线，即能准确读出所测浸油的折射率值。

测定时滴油不宜过多，这样容易污染楔形油槽，使狭缝折射像不清晰。测定后必须立即把油槽清洗干净，否则将影响下次测定精度。

这种仪器比较简单，易于使用和携带，用油量少，适合野外工作，测定的折射率范围较大。但其精度比阿贝折射仪差，而且没有变温装置。

测定的浸油折射率值，必须注明测定时的温度，因为浸油折射率值随温度变化而改变。温度升高，浸油的折射率减小；温度降低，浸油的折射率增大。温度改变 1℃，浸油折射率的变化数值称温度变化系数，以 dn/dt 表示。温度变化系数因浸油性质不同而不同，一般为 0.0007～0.003 之间。通常，折射率大的浸油温度变化系数大。大致的关系是：

$N<1.600$　　　　$dn/dt\approx0.0005$

$N=1.600\sim1.700$　　　　$dn/dt\approx0.0006$

$N>1.700$　　　　$dn/dt\approx0.0007$

在实际测定工作中，如果测定矿物折射率时的温度与配油时的温度不同，则必须校正。其校正公式是：

$$N_t = N_0 + (T - t)\cdot dn/dt$$

式中 N_0 为配油时浸油的折射率，T 为配油时的室温，t 为使用浸油时的室温，N_t 为鉴定矿物时室温条件下浸油应具的折射率值，dn/dt 为温度变化系数。

除温度影响之外，浸油放置时间过长，因挥发作用或化学变化，还可使浸油的折射率发生改变。因此，在测定矿物折射率时，最好用折射仪重新测定浸油的折射率。

部分浸油能氧化，在日光下部分浸油能分解，所以装浸油的小瓶应当是暗色瓶，而且需加盖封紧。浸油瓶应按顺序放置在特制的木箱内。

7.2　油浸法测定折射率的方法

7.2.1　碎屑油浸薄片的制备方法

1. 由岩石中取下欲测矿物，敲碎过筛，使用的碎屑直径一般为 0.05～0.1mm。破碎时不宜研磨，以保持矿物碎屑的原始状态。

2. 取一块载玻璃片用软纸擦干净，再取少许矿粉置载玻璃片的中心，并使矿粉均匀散开。

3. 在矿粉之上加一小块盖玻璃（只需普通盖玻璃的 1/4 大小）。用浸油瓶中的滴管，取少量浸油，使滴管末端靠近盖玻璃边缘，依靠毛细作用，使浸油慢慢渗入盖玻璃与载玻璃之间的矿粉中，直至浸油填满盖玻璃所覆盖的空间而且没有气泡为止。注意浸油不宜过多，以免矿物与盖玻璃浮动而影响观察。

制成的碎屑油浸薄片，置显微镜下观察。如果浸油的折射率比矿物大或小时，必须更换另一种浸油。换油的方法一般有以下几种：

①将矿粉及浸油用软纸擦掉，按上述方法重新制备新的碎屑油浸薄片。这种方法适用于均质体和一轴晶矿物，而且矿粉较多时。

②用吸油纸将浸油吸出，用新油冲洗 3～4 次后，再滴入新浸油。这种方法适用于二轴晶矿物及矿粉较少的情况。

还有一种方法是不换油，采取加入新油与原来的浸油混合，至矿物与浸油折射率相等为止。把混合后的浸油细心取出，用折射仪测定其折射率值。

7.2.2 碎屑油浸薄片中，比较矿物碎屑与浸油折射率相对大小的方法

1. 贝克线法：根据矿物碎屑与浸油接触处贝克线的移动规律，判断二者折射率的相对大小。提升镜筒，贝克线向矿物移动，说明矿物的折射率大于浸油折射率；反之，浸油的折射率大于矿物的折射率。如果用单色光观察时，当矿物的边缘和贝克线消失时，证明矿物的折射率与浸油的折射率相等或近于相等。

2. 色散法：当矿物折射率与浸油折射率相差不大(0.01 以下)时，用白光照射，在矿物与浸油接触处，常出现天蓝色和橙黄色色带，这是由于矿物与浸油的折射率色散不同引起的。大多数矿物折射率色散小于浸油折射率色散，矿物的色散曲线比浸油色散曲线平缓。二者色散曲线交点位置不同，其色散效应不同，提升镜筒，色带移动情况亦不相同。

①当色散曲线交点位于蓝光处(图 4.7.3(a))，即矿物折射率大于浸油。对于蓝光，矿物折射率与浸油折射率相等(对于其附近波长单色光近于相等)，蓝光不发生折射(其附近单色光折射角很小)(图 4.7.3(b))，它们在矿物边缘形成天蓝色色带；对于黄橙等色光，矿物折射率大于浸油，发生折射，在矿物边缘稍内形成橙黄色色带。提升镜筒，橙黄色色带向矿物内移动，而天蓝色色带基本不动(图 4.7.3(c))。

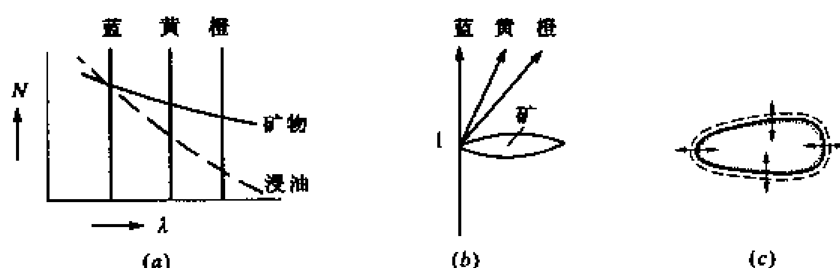


图 4.7.3 矿物折射率大于浸油折射率时，色带形成原理及移动规律示意图

(箭头方向代表色带移动方向，其长短代表色带移动速度)

②当色散曲线交点位于橙光处(图 4.7.4(a))，即矿物折射率小于浸油。对于橙光，矿物折射率与浸油折射率相等(二者在黄、红光下近于相等)，橙光不发生折射(黄、红光折射角很小)(图 4.7.4(b))，它们在矿物边缘形成橙黄色色带；对于蓝绿等色光，矿物折射率小于浸油，发生折射，在矿物边缘稍外形成天蓝色色带。提升镜筒，天蓝色色带向浸油移动，而橙黄色色带基本不动(图 4.7.3(c))。

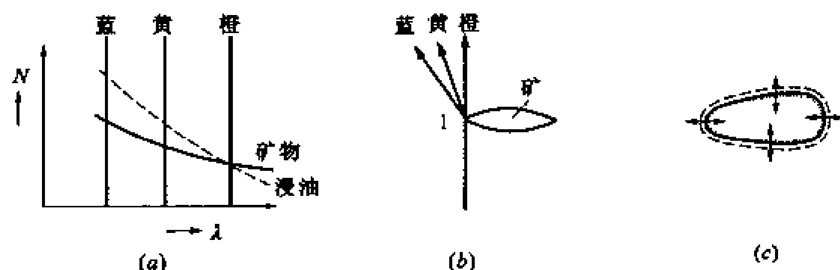


图 4.7.4 当矿物折射率小于浸油折射率时，色带形成原理及移动规律示意图

③当色散曲线交点位于黄光处(图 4.7.5(a))，即矿物折射率等于浸油折射率。对于黄光，矿物的折射率等于浸油折射率，不发生折射(图 4.7.5(b))；对于蓝绿等色光，矿物折射率

小于浸油，向浸油折射，在矿物边缘稍外形成天蓝色色带；对于橙红光，矿物折射率大于浸油，向矿物内折射，在矿物边缘稍内形成橙色色带。提升镜筒，天蓝色色带向浸油移动，橙色色带向矿物移动，二者的移动速度及色带宽度近于相等(图 4.7.5(*c*))。

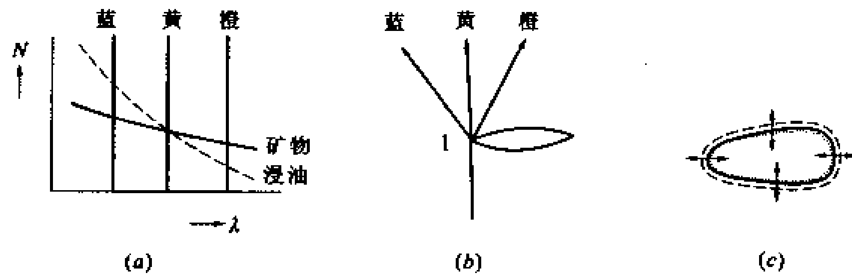


图 4.7.5　当矿物折射率等于浸油折射率(黄光)时，色带形成原理及移动规律示意图

利用色散法测定的折射率(黄光)精度可达 0.003 以上。

当矿物的色散曲线与浸油色散曲线平行或近于平行时，即使矿物折射率与浸油折射率相差不大，也不出现色带或色带不明显。当矿物色散曲线比浸油色散曲线倾斜较陡时，色带的位置及其移动规律恰与上述情况相反。因此，对于折射率色散很强的少数矿物及大多数无机和有机化合物，不能采用色散法测定折射率值，必须用单色光照射，观察贝克线移动情况，测定折射率。

用油浸法测定折射率时，不宜用高倍物镜，因为放大倍数愈高，透镜曲率愈大，愈容易产生色差及球面差。色差和球面差所产生的效应容易与色带及贝克线混淆。图 4.7.6(*a*)表示透镜产生的色差。由于透镜的分光作用，蓝光的焦距短，红光的焦距长，因而在图中的 1 处产生无色边，在 2 处产生中部蓝边缘红，在 3 处产生中部红边缘蓝，提升镜筒时，总是有亮边或带色的亮边移动。图 4.7.6(*b*)表示透镜产生的球面差。透镜边缘的光线焦距短，中部的光线焦距长，因而在 1 处中央亮，在 2 和 3 处边缘亮；提升镜筒，总有一个亮边向外移动。当出现上述情况时，改用倍数较低的物镜，可以消除这种现象。

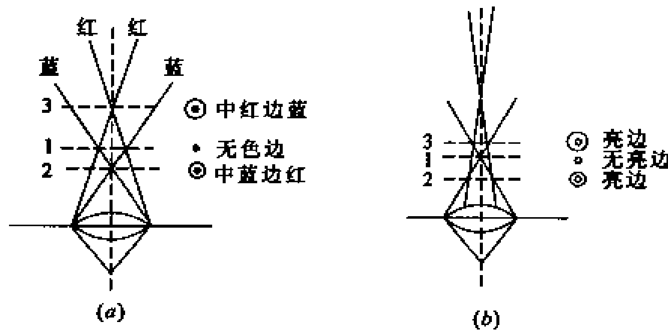


图 4.7.6　物镜所产生的色差及球面差示意图

7.2.3　油浸法测定折射率的具体步骤

将碎屑油浸薄片置正交偏光镜间，如果所有的碎屑颗粒都为全消光，则此矿物为均质体。如果矿物碎屑具干涉色，转动载物台呈现四明四暗现象，则此矿物为非均质体。

1. 均质体矿物折射率的测定

均质体矿物只有一个折射率。在碎屑油浸薄片中，利用贝克线或色散条带，比较浸油与矿

物折射率的相对大小。通过不断换油，直至矿物与浸油折射率相等，或矿物折射率值介于相邻两种浸油之间为止。

根据矿物在浸油中所显示的突起高低、边缘明显程度决定换油间距。如果矿物的突起高，边缘很明显，在换油时可以间隔几瓶浸油，反之，则必须按高低顺序换油。每次换油后的观察结果，必须仔细记录。如果矿物测定结果的记录如下：

第一次：浸油折射率＝1.640，突起较高，边缘很明显，提升镜筒，贝克线向浸油移动；矿物折射率＜浸油。

第二次：浸油折射率＝1.580，突起较低，边缘不太明显，提升镜筒，贝克线向浸油移动；矿物折射率＜浸油。

第三次：浸油折射率＝1.576，突起很低，边缘不明显，出现色散条带，提升镜筒，天蓝色色带向浸油移动，橙黄色色带基本不动；矿物折射率＜浸油。

第四次：浸油折射率＝1.572，突起很低，边缘不明显，出现色散条带，提升镜筒，橙黄色色带向矿物移动，天蓝色色带基本不动；矿物折射率＞浸油。

由以上记录可知，矿物折射率介于1.572～1.576之间，因而矿物的折射率为：

$$\frac{1.576+1.572}{2}=1.574\pm0.002\text{（即误差在 0.002 以内）}$$

如果浸油间距为0.003，则其误差可能为0.0015。

2. 非均质体矿物折射率的测定

在碎屑油浸薄片中，选一个干涉色最低的颗粒，在锥光镜下确定轴性，测定光性符号。如为二轴晶，估计2V大小。

(1)一轴晶矿物主折射率的测定

一轴晶矿物有N_o、N_e两个主折射率，通常只测定N_o，必要时才测定N_e。其测定方法：

①测定矿物的N_o值：选一个垂直光轴的颗粒，其特点是：正交偏光镜下全消光，锥光镜下显一轴晶垂直光轴的干涉图。其光率体切面为圆切面，半径等于N_o，即任何方向的折射率均为N_o。其测定方法与均质体矿物相同。

如果找不到垂直光轴的颗粒，可用斜交光轴的颗粒代替。这种颗粒的光率体椭圆半径中，总有一个半径为N_o，正光性，$N_o=N_p$；负光性，$N_o=N_g$。如果光性符号已经测定，在正交偏光镜下即能定出N_o方向。转动载物台，使N_o平行PP（此时应消光），推出上偏光镜，根据贝克线或色带移动规律，比较矿物的N_o与浸油折射率的相对大小。通过不断换油，即能测得矿物的主折射率N_o的大小。

②测定矿物的N_e值：测定主折射率N_e值，必须用平行光轴的切面。这种方向的碎屑干涉色级序最高，锥光镜下显瞬变干涉图。其光率体椭圆半径之一为N_e，另一个半径为N_o。正光性$N_e=N_g$，$N_o=N_p$；负光性$N_e=N_p$，$N_o=N_g$。光性正负确定之后，在正交偏光镜下，确定N_e与N_o的方向。转动载物台，使N_e平行PP。推出上偏光镜，比较N_e与浸油折射率的相对大小；转动载物台90°，使N_o平行PP，比较N_o与浸油折射率的相对大小。通过不断换油，可测出矿物的N_e与N_o值的大小。

平行光轴的颗粒，一般不易得到，因此，测定矿物的N_e值时，最好采用吸油方法换油。

(2)二轴晶矿物主折射率的测定

二轴晶有N_g、N_m、N_p三个主折射率，一般只测定N_m，有必要时才测定N_g、N_p值，其测定

方法如下：

①测定矿物的 N_m 值：选择一个垂直光轴的颗粒，其特点是：正交偏光镜下全消光或呈灰黑色，转动载物台，其明暗程度无变化或变化很微弱，锥光镜下显二轴晶垂直光轴切片的干涉图。这种方向颗粒的光率体切面为圆切面，其半径等于 N_m，即其任何方向均为 N_m，故测定方法与均质体矿物相同。

如果找不到垂直光轴的颗粒，可用垂直光轴面的斜交光轴切面（最好光轴倾角不大）代替。这种颗粒的特点是：正交偏光镜下，干涉色较低，锥光镜下干涉图的特征是当光轴面平行 PP 或 AA 时，直的黑带通过视域中心而平分视域。此时垂直黑带的方向即为 N_m 方向。转动载物台，使 N_m 方向平行 PP（即黑带平行 AA）。取消锥光镜装置，在单偏光镜下，根据贝克线或色带移动规律，比较 N_m 与浸油折射率的相对大小。通过不断换油，即可测出 N_m 值的大小。

在垂直 Bxa 或垂直 Bxo 的颗粒上也可测定 N_m 值。除 N_m 之外还可测定 N_g 或 N_p。

②测定矿物的 N_g 和 N_p 值：选一个平行光轴面的颗粒，这种颗粒的特点是：正交偏光镜下，干涉色级序最高，锥光镜下显瞬变干涉图。其光率体椭圆半径为 N_g 与 N_p。在正交偏光镜下确定 N_g 与 N_p 方向之后，转动载物台，使 N_g 平行 PP（此时应消光）。推出上偏光镜，比较 N_g 与浸油折射率的相对大小；转动载物台 90°，使 N_p 平行 PP，比较 N_p 与浸油折射率的相对大小。通过不断换油，即可测出 N_g 与 N_p 值的大小。

测定二轴晶矿物 3 个主折射率时，所用的定向颗粒都不易得到，所以一般都采用吸油方式换油。为了避免吸油时颗粒方位变动，在制备碎屑油浸薄片时，可先用 5%的透明胶将碎屑粘在载玻璃上。

3. 其他光学性质的观察

在油浸法测定矿物折射率时，还必须同时观察矿物的其他特征，如颜色、多色性、吸收性、解理、消光类型、消光角大小、干涉色级序高低（比薄片中高）、轴性、光性符号、$2V$ 大小及色散现象等。根据测得的折射率值及其他光学特征，查阅有关《透明矿物鉴定表》，可定出矿物名称。如为固溶体矿物，查阅该矿物的鉴定曲线，能定出该矿物中端员组分的百分含量。

用油浸法测定非均质体矿物的主折射率时，需要在一定方位的碎屑颗粒上进行。然而，在碎屑油浸薄片中，寻找所需的定向颗粒相当困难，有时根本找不到需要的定向颗粒。如果在显微镜载物台上装上一个旋转针台，则可解决油浸法中颗粒的定向问题。测定时，将欲测矿物碎屑粘在旋转针轴的针尖上，再把针尖插入装有浸油的油槽中。通过针轴（水平轴）和显微镜载物台转轴（直立轴）的联合转动，可以使一轴晶矿物光率体的 N_e、N_o 轴，二轴晶矿物光率体的 N_g、N_m、N_p 轴分别平行 PP。利用贝克线或色带移动规律，比较它们与浸油折射率的相对大小。通过更换油槽中的浸油，即可测出非均质体矿物各个主折射率值。利用旋转针台，在一个碎屑颗粒上，可同时测出各个主折射率值，且换油方法简便。测出的主折射率较准确，所需样品极少。旋转针台的结构及详细测定方法，可参看有关旋转针台的专门书籍。

附录1　岩石薄片中矿物颗粒大小及含量的测定

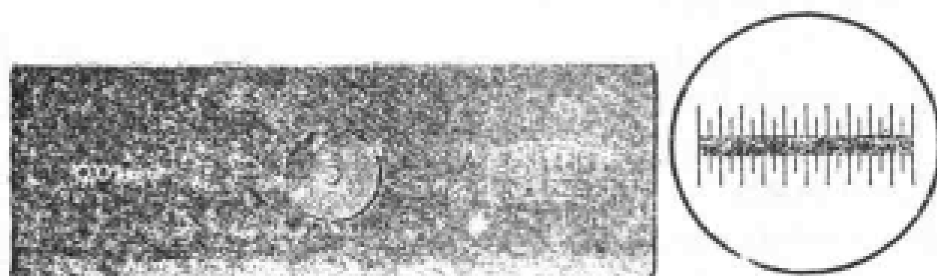
在偏光显微镜下，对岩石薄片中的矿物成分详细鉴定之后，某些岩石还必须测定矿物颗粒大小(粒度)及其百分含量。它将为岩石定量分类、成因、物理性质及工艺性能提供基础数据。

一、岩石薄片中矿物颗粒大小的测定

岩石薄片中矿物颗粒大小(粒度)，通常用矿物颗粒切面的直径表示。等轴状矿物颗粒，一般测定其平均直径；板状、柱状矿物颗粒，则需测定其最大直径和最小直径。目前常用的测量方法大体上有下列三种：

1. 人工测量：用目镜分度尺测量。目镜分度尺有固定式和滑板式两种，前者是将分度尺固定在目镜中，后者则是借助于精密螺旋杆，使分度尺在视域内平行移动，使用起来比较方便。在测定粒度之前，根据颗粒大小选用适当放大倍率的物镜。目镜分度尺每一小格所代表的实际长度(格值)，可以应用物台微尺进行标定。

物台微尺(图附录1.1)是嵌在一个玻璃片的圆圈中，一般长度2毫米并分为200小格，每一小格等于0.01毫米。有的物台微尺长度1毫米，分100小格。



图附录1.1　物台微尺

利用物台微尺标定目镜分度尺长度的方法：

(1)将物台微尺置显微镜载物台上，准焦。

(2)使物台微尺与目镜分度尺平行，并使二者的零点对齐。仔细观察两个微尺的分格线再次重合的部位。例如目镜分度尺的50小格与物台微尺48格相当，则目镜分度尺每一小格所代表的实际长度$=\frac{48}{50}\times 0.01$毫米$=0.0096$毫米。

其通式为：

$$\text{目镜分度尺每小格的实际长度(格值)}=\frac{\text{物台微尺格数}}{\text{目镜分变尺格数}}\times 0.01\ \text{毫米}$$

知道了目镜分度尺每小格所代表的实际长度之后，即可直接测定岩石薄片中矿物颗粒的直径。其方法是通过机械台和转动物台移动岩石薄片，或移动目镜分度尺(滑板式分度尺)，使矿物颗粒直径对准分度尺，读出与矿物颗粒直径相当的分度尺格数，再乘以分度尺的实际长度，即得矿物颗粒的直径。

2. 半自动测量：其方法与装置较多，目前我国常用的是数字显示显微粒度分布测定仪。其原理是把滑板式目镜分度尺的读数值，通过模拟-数字转换电路转换以后，直接由数码管显示出粒度数值，并用一套逻辑电路对粒度大小自动分级，用计数器记录和用数字打印机输出数

据。目镜分度尺每小格实际长度的换算仍需人工操作，只是用电子装置自动显示与记录粒度值。效率高，精度亦高。

3. 自动测量：用图像分析仪测定矿物颗粒的粒度。图像分析仪的基本原理是把显微镜的光学图像，通过电视摄像机转变成电视信号，用电子计算机或模拟-数字转换电路对电视信号进行处理与测量，最后可自动测量粒度，其数据由数码管显示，并由打印机输出、记录。若遇到复杂样品或亮度反差很低的样品时，可用“光笔”组件，通过人—机联系，由人和计算机共同完成图像分析任务，此时人帮助检测图像，计算机对图像进行测量。测定岩矿样品一般应配备光笔。

图像分析仪的特点是自动化，效率高，可免去人工测量中的视觉疲劳和冗长、乏味的计算、统计工作。图像分析仪的精度可达到精确的人工测量水平。

目前国外的仪器型号有：英国剑桥仪器公司的 Q720 型、西德莱兹厂的 TIA 型、美国微孔公司的 πMC 型、日本小西六株式会社的樱花—1500 型等。国内有关单位正在进行研制，目前已研制成功的有 TX-2 型图像分析仪。此外，国内也有进口的图像分析仪。

显微镜下粒度测量的下限，从理论上讲大约为 0.25μm，但由于技术条件限制，一般能准确测定为 1μm，岩石薄片中一般能测到 5μm。

粒度测量的误差大小，主要取决于颗粒形状、粒度均匀程度和测量的颗粒数。粒度测量的误差，一般用粒度概率分布图判别。

二、岩石薄片中矿物百分含量的测定

岩石中矿物的百分含量，是指矿物在岩石中所占的体积百分比。岩石薄片中矿物的含量是用面积百分比表示，其测定方法大体上有以下几种：

(一)人工测定

主要有下列几种方法：

1. 面积法

这种方法是根据岩石薄片中，各矿物所占的面积百分比近似于矿物在岩石中所占的体积百分比。显然，测定的面积愈大，二者的百分比愈相近。测定时利用目镜方格网与机械台(图附录 1.2)配合进行。机械台有固定螺丝，使用时，可将它安装在显微镜的载物台上。其上还有两个移动螺旋，可以使薄片前后左右移动。

其测定步骤如下：

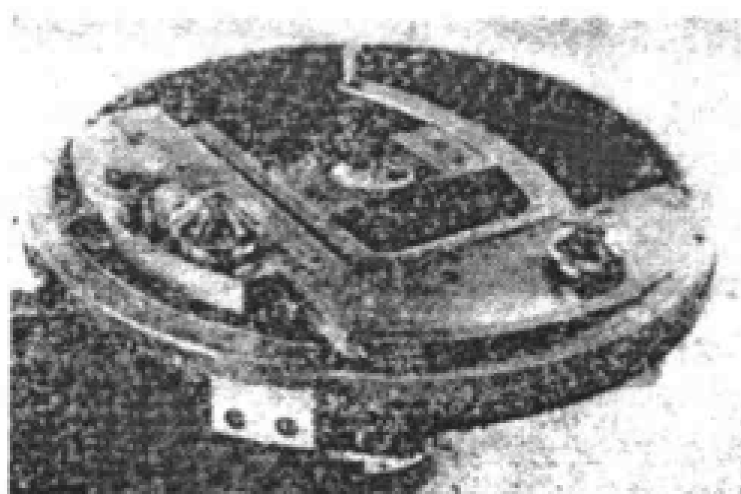
(1)把目镜方格网安置在目镜中，把机械台安装在显微镜物台上，旋紧固定螺旋使之固定。同时使载物台固定。把岩石薄片放置在机械台中并卡好。

(2)准焦后，轻轻扭动机械台的移动螺旋，移动薄片，使岩石薄片左上边缘与目镜方格网的边缘一致。

(3)计算整个视域中，每种矿物所占的小方格数。在矿物的边缘部分，往往只截取小方格的一部分，此时可将所有不满的小方格部分估计折合为整的方格数。把各种矿物所占的小方格数记录于附表 1 中。

(4)第一个视域计算完毕之后，扭动机械台的水平移动螺旋，使薄片向右移动至另一部分，按上述方法计算各矿物所占的方格数，记录于附表 1 中。

(5)第一条测区测定完毕之后，扭动机械台上的垂直移动螺旋，使薄片向下移动至第二条测区，按上述方法测定第二条测区的各个视域。



图附录 1.2　安装在载物台上的机械台

附表 1

视　域	矿物所占的小方格数目			
	第一种矿物	第二种矿物	第三种矿物	第四种矿物
1				
2				
3				
4				
⋮				

如此左右上下连续测完整个薄片，分别计算每一种矿物所占方格数之和。设各矿物所占的总方格数为 100%，再计算出每种矿物所占面积的百分比。

岩石的粒度、结构、构造能影响计算的准确性。一般粒度愈大，结构愈不均匀，测量的薄片数目应当愈多。粗粒或结构不均匀的岩石，至少测量 2～3 块薄片。测定粗粒岩石常用低倍物镜，细粒岩石常用中倍物镜，总之以每个矿物颗粒不超过目镜分度尺的 3～5 小格为宜。

结构、构造不均匀的岩石，还应当选择合适的切片方向。如具片状构造的岩石，应当选择垂直片理的方向。

此方法的缺点是：计算繁杂，花时间多，易使目力疲劳，精确度不太高。

2. 直线法

这个方法是根据岩石薄片中，各矿物的总长度之比大约相当于各矿物的面积之比，而各矿物的面积之比又与各矿物的体积之比相近。显然，测定直线的总长度必须相当长，才能保持一定的精度。也就是说，测定的直线总长度愈长，矿物的总长度之比愈接近于它们的体积比。通常认为，测定总长度必须至少为岩石中矿物颗粒平均粒径的一百倍以上。

其测定方法主要有以下两种：

(1)使用目镜分度尺与机械台配合的测定方法

①使岩石薄片的左上方与目镜分度尺左端重合。分别计算各个矿物所占的刻度格数，并记录于附表 2 中。扭动机械台的水平移动螺旋，使薄片向左移动至第二个视域。分别计算各个矿物所占的刻度格数。移动薄片继续计算，直至第一条测线计算完毕。

②扭动机械台的垂直移动螺旋，使薄片向下移动至第二条测线。测线之间的间距，决定于岩石的粒度大小，通常测线之间的间距，大约相当于岩石的平均粒度。在第二条测线上，仍按上述方法测定各个矿物的刻度格数，并记录在附表2中。

附表2

视　域	各个矿物所占的刻度格数			
	第一种矿物	第二种矿物	第三种矿物	第四种矿物
1				
2				
3				
⋮				

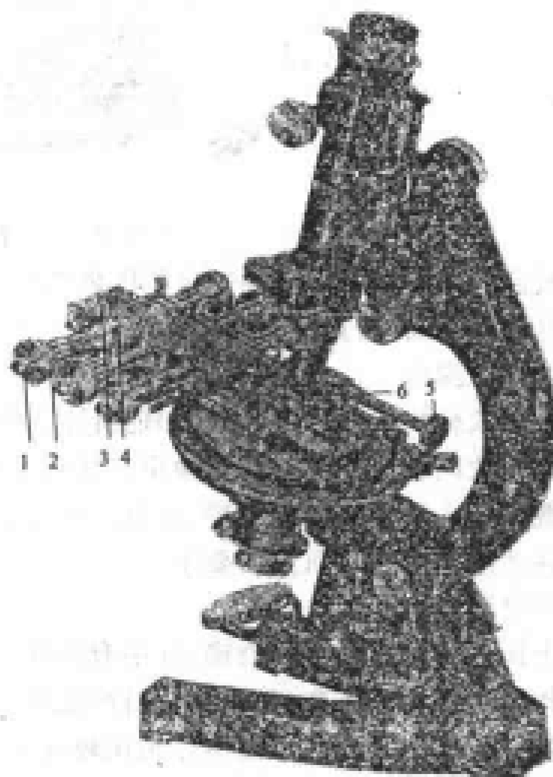
如此继续测定第三、第四……测线上各矿物的刻度格数，直至整个薄片测定完毕为止。

计算出测定线的总刻度格数及每一种矿物的总刻度格数，据此换算出每一种矿物在岩石薄片中的长度百分比。

这个方法的缺点是耗时多，较麻烦，但比面积法的精度高。

(2)用六轴计积台测定的方法

六轴计积台(图附录1.3)，是一个金属圆板，并有长形滑板与之相连。在长形滑板之上，装有6个带刻度的微动螺旋杆(螺旋测微尺)。扭动微动螺旋，能使滑板作直线移动，其移动距离可直接从螺旋杆上读出。在滑板与长方形金属板上有一个长方形孔，薄片即安置在孔之上，并有弹簧夹夹紧薄片。测定时将六轴计积台安装在显微镜载物台上(安装时去掉载物台中部的圆盘)，使6个微动螺旋上的零点对准螺旋杆上的零点，扭紧固定螺丝。以一个微动螺旋代表岩石薄片中的一种矿物。扭动粗动螺旋(能使滑板前后左右移动)，使岩石薄片边缘的一端与目镜十字交点重合。如开始的第一种矿物为石英，则扭动代表石英的微动螺旋，直至石英颗粒的另一端到达十字丝交点为止。紧接着为另一种矿物，扭动代表另一种矿物的微动螺旋至该矿物的另一端到达十字丝交点为止。如此逐个矿物移动，直至第一测线移完。放松6个固定螺旋，使滑板回复原位，扭动粗动螺旋，使薄片向左或向右移动一定间距(间距长度约为岩石的平均粒度)。按上述方法开始第二条线的测定。如此测定第三、第四……测线，直至将整个薄片测完为止。

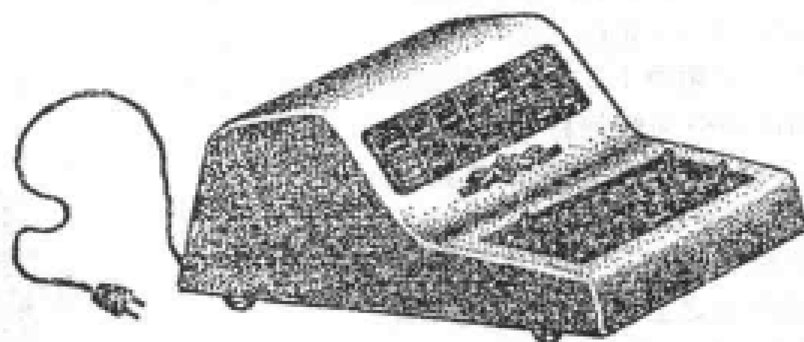


图附录1.3　安装在显微镜物台上的六轴计积台
1,2—带刻度的微动螺旋杆(螺旋测微尺)；
3,4—固定螺丝；5—粗动螺旋(使滑板左右移动)；
6—粗动螺旋(使滑板前后移动)

记下各个微动螺旋杆上的累计读数，计算各个矿物所占的总长度百分比。

(二)半自动测定

使用自动点计数器测定。自动点计数器由机械台和自动记录器组成(图附录 1.4)。机械台内有一套钟表式齿轮装置，可装在载物台上。自动记录器上装有 8～12 个按键。机械台与自动记录器之间有电路联结。按一次自动记录器上的按键，可使机械台(带动岩石薄片)按一定间距跳动一次，并在与按键相应的小窗内自动记录一个点。测定时，使自动记录器上的一个键代表一个矿物。把机械台安装在显微镜载物台上，将岩石薄片夹在机械台上。用机械台上的粗动螺旋和移动滑杆调节，使岩石薄片左上边边缘对准目镜十字丝交点。当某种矿物的一端位于十字丝交点时，按代表该矿物的键，使机械台(带动岩石薄片)按一定间距跳动，直至薄片中矿物的另一端跳移至十字交点为止。依次测定每个矿物，直至第一条线测定完毕。扭动机械台上的粗动螺旋，使薄片向上移至第二条测线(两条测线之间的间距根据岩石平均粒度选择)，用移动滑杆使薄片回至左端，以同样的方法测定。如此测定第三、第四……测线，直至整个薄片测定完毕为止。计算出每种矿物的点数占总点数的百分比，此百分比即代表各矿物的体积百分比。



图附录 1.4　自动点计数器

机械台的跳距可按需要在一定范围内调节。目前仪器上的最密跳距约为 0.05mm。

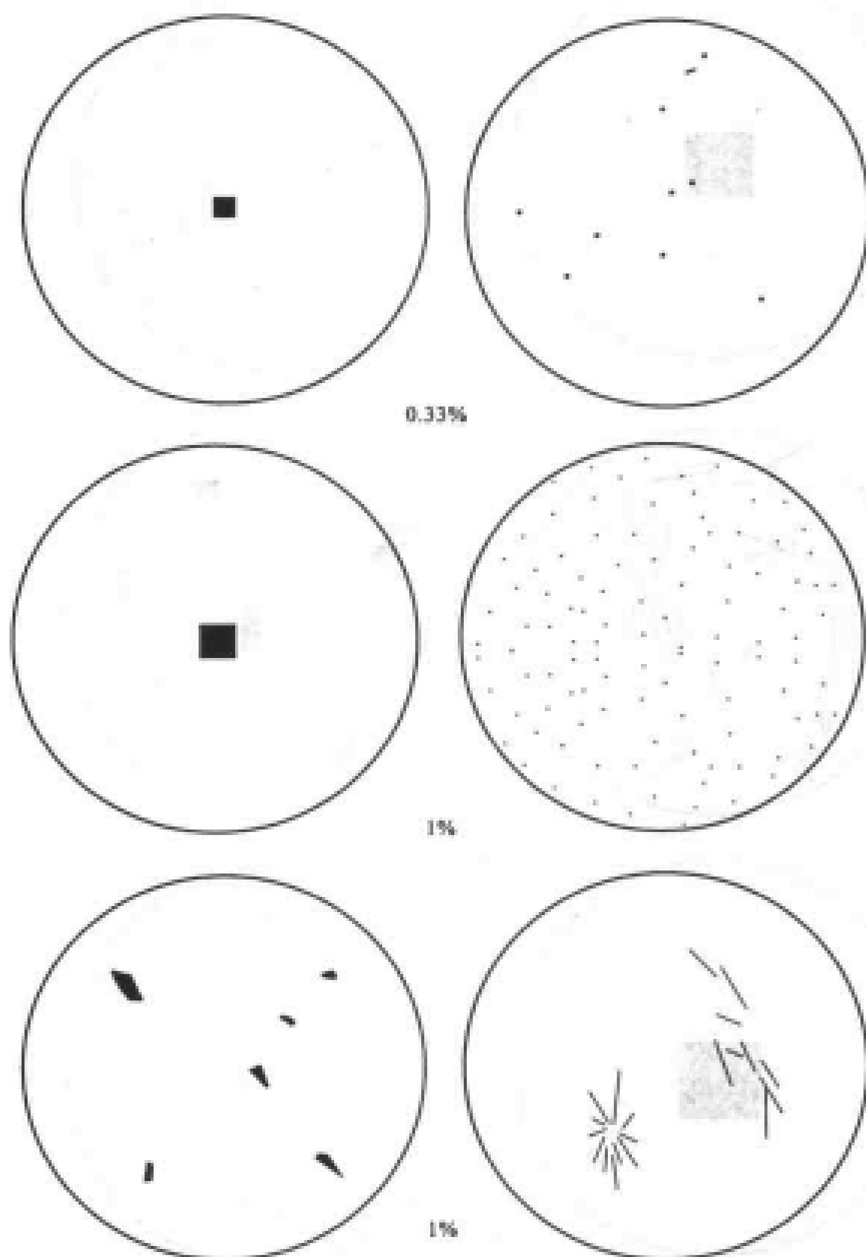
此方法效率高，可达一定精度，是目前广泛使用的方法。

(三)自动测定

使用图像分析仪测定，其原理如前所述。用这种方法是对岩石薄片的全部面积进行测量，测量数据由数码管显示或打字机输出。其优点是效率高，精度高，自动化操作，可与计算机连接或把数据输入计算机进行处理、分析。由于岩石薄片中矿物成分复杂，图像分析仪必须配备光笔部件才能满足岩矿研究的要求。

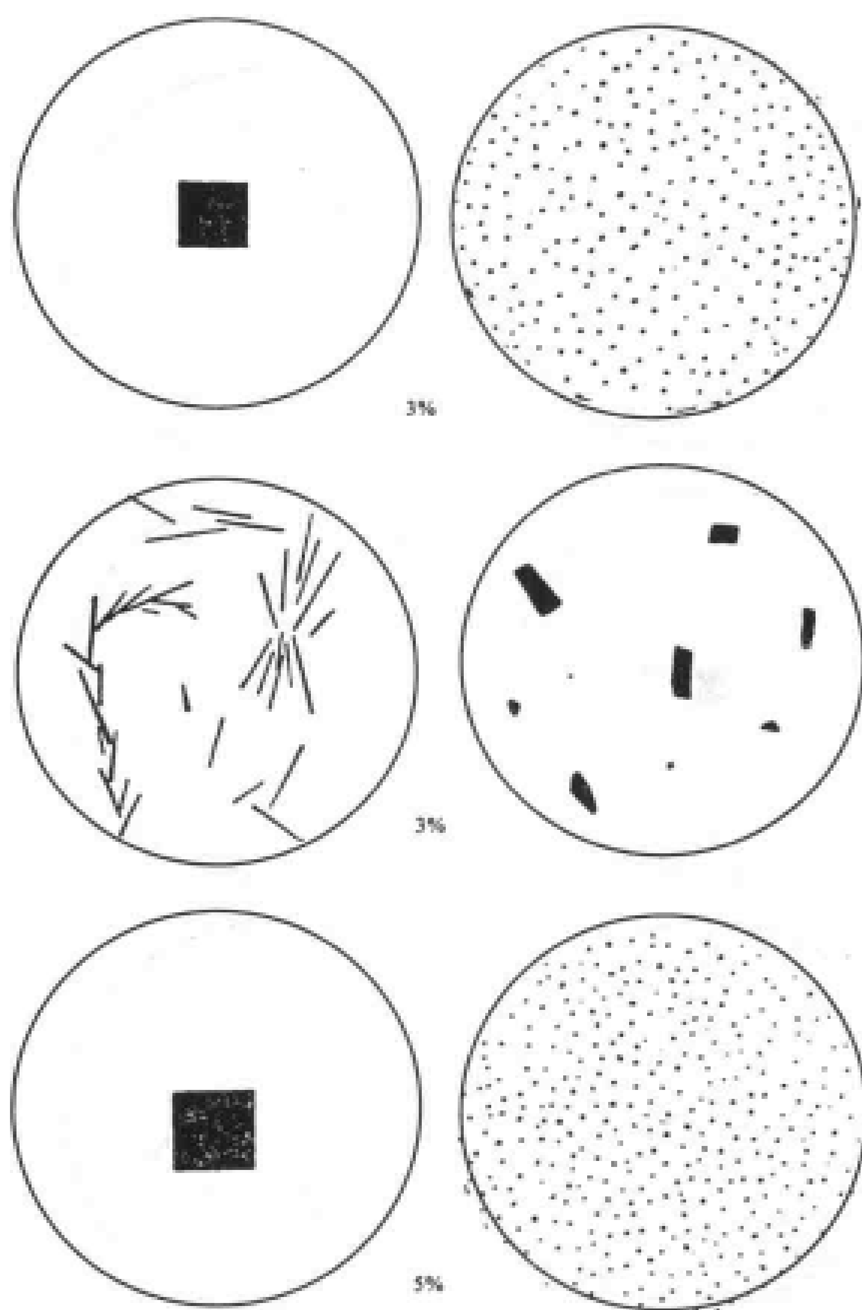
(四)目测比较法

以上所述的方法虽较为准确，其中有的方法耗时间多，有的方法需要较贵重的仪器设备。如果工作要求的精度不高，可以采用目测比较法，粗略估计岩石薄片中矿物的百分含量。目估矿物含量一般使用一套标准图案作为比较标准。必须注意，矿物的颗粒大小不同，颗粒数目差别很大。矿物形状不同，暗色矿物和浅色矿物的估计都有一定差异。图附录 1.5 表示颗粒大小不同、形状不同，以及浅色矿物和暗色矿物的百分含量图案，供目测对比时参考。



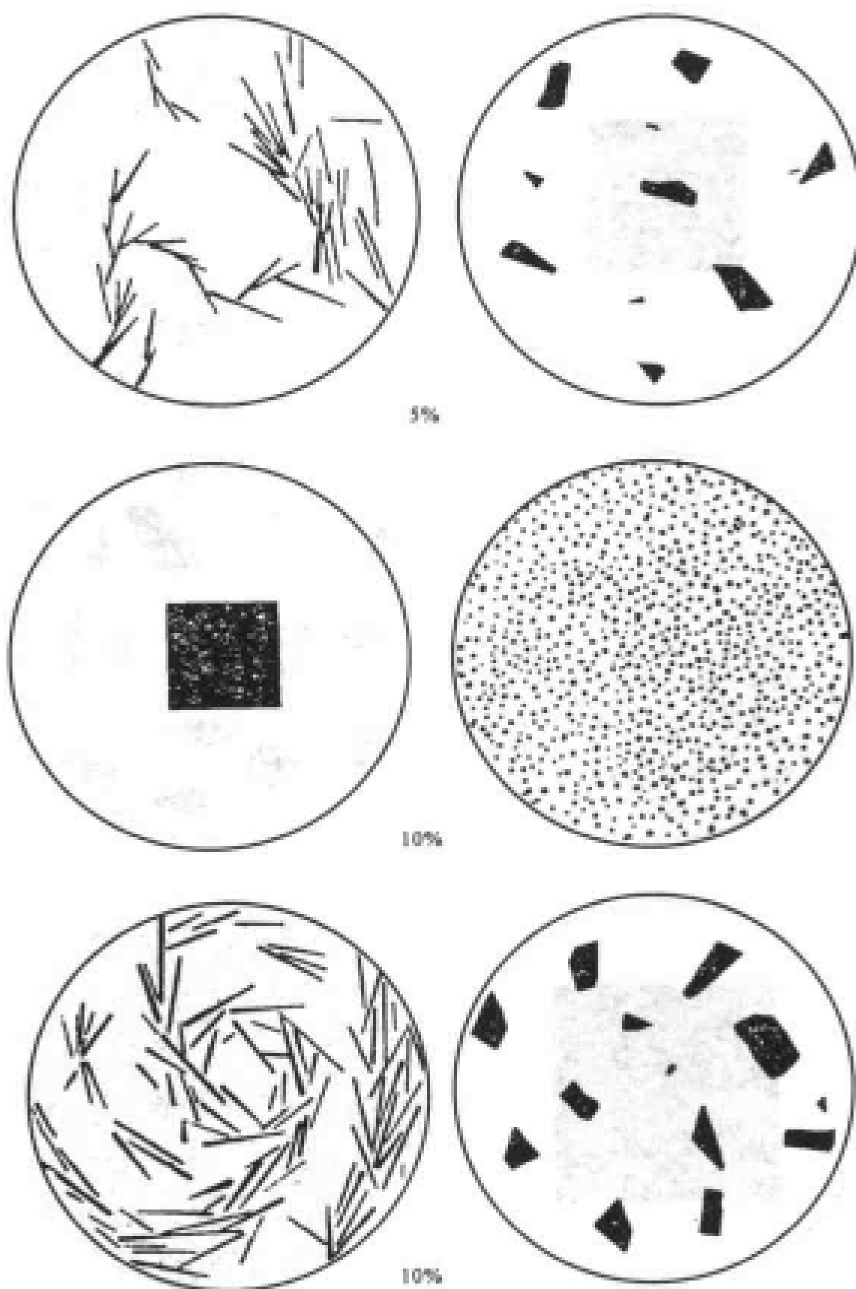
图附录 1.5(a)　岩石薄片中矿物百分含量图案

（据 黑田吉益）



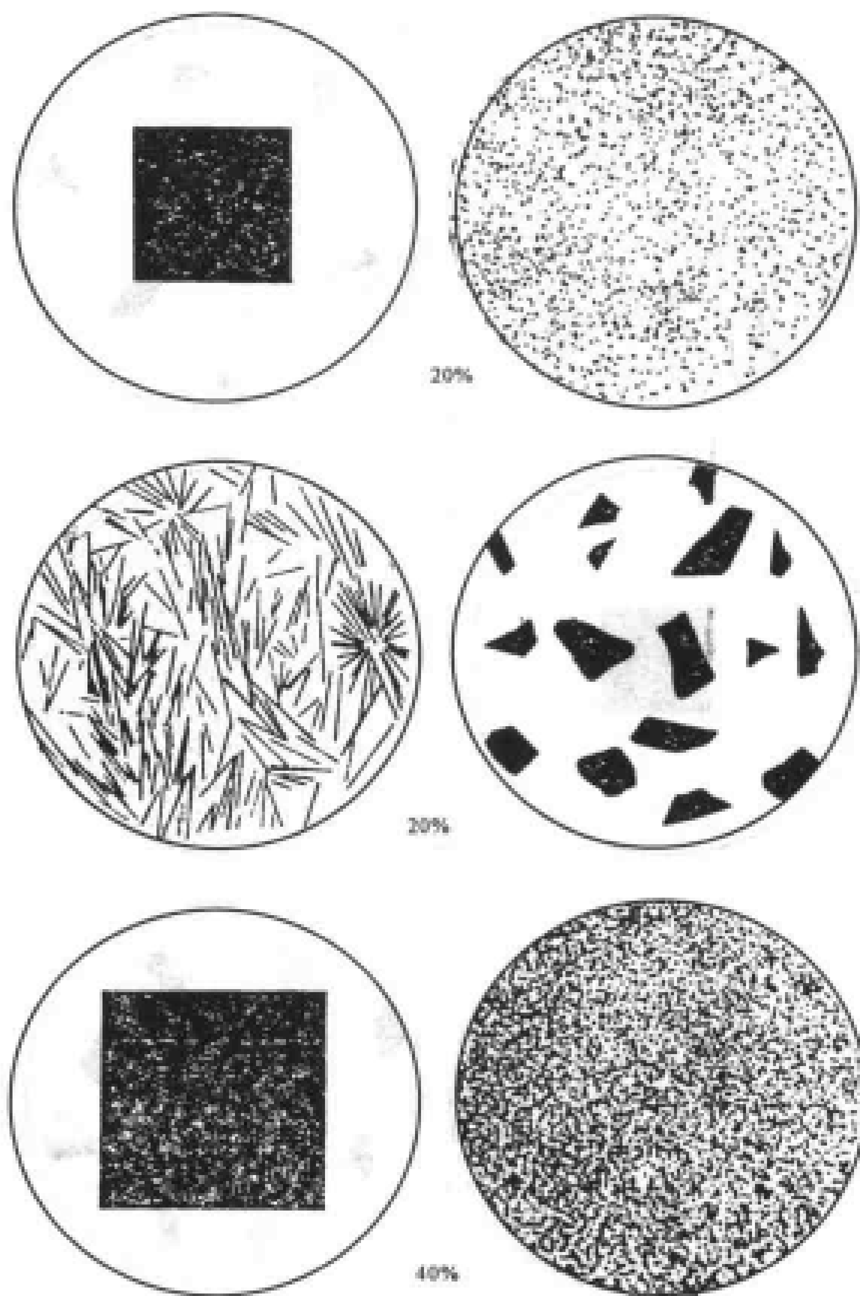
图附录 1.5(b) 岩石薄片中矿物百分含量图案

（据 黑田吉益）



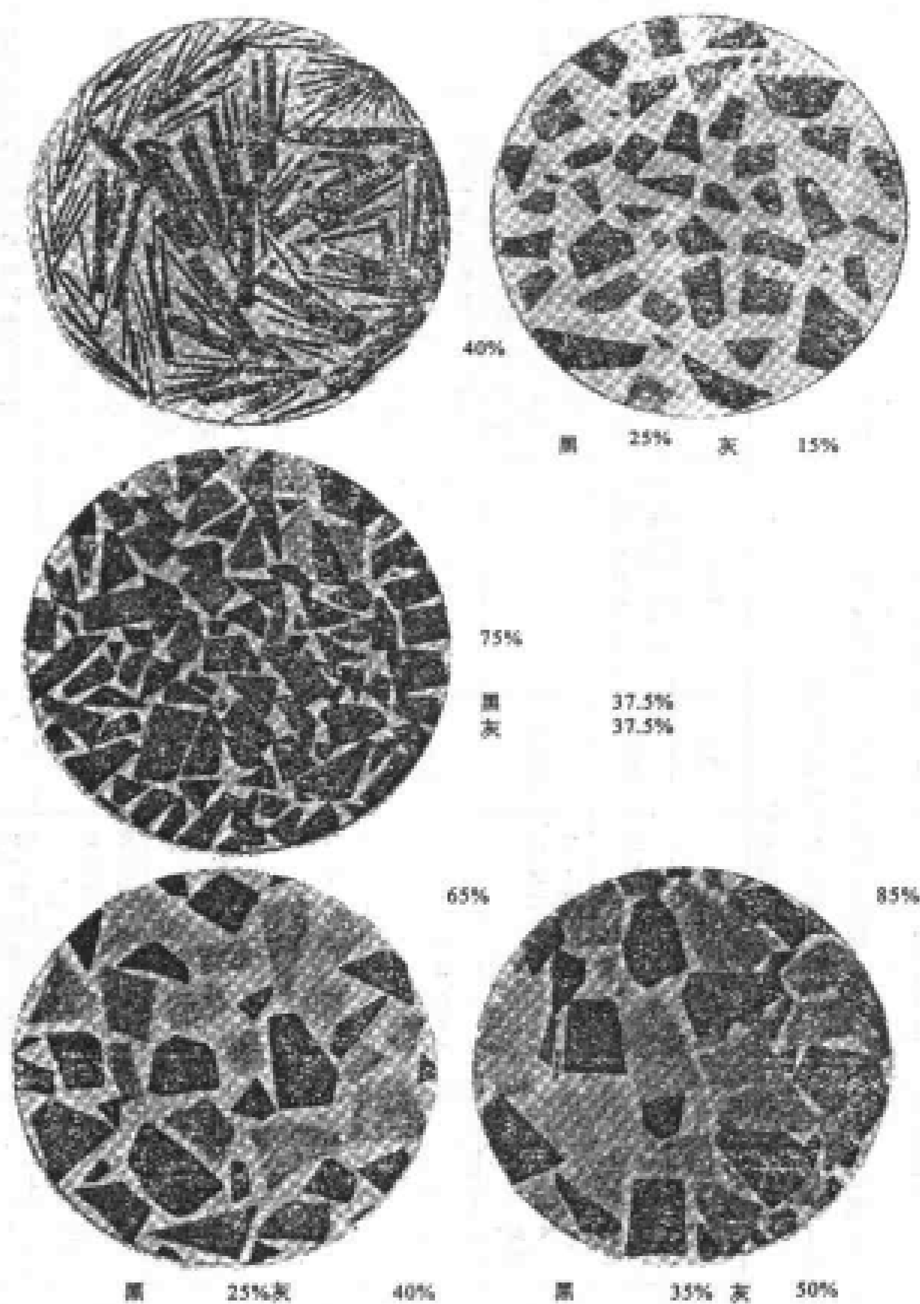
图附录 1.5(c) 岩石薄片中矿物百分含量图案

(据 黑田吉益)



图附录 1.5(*d*) 岩石薄片中矿物百分含量图案

(据 黑田吉益)



图附录 1.5(*e*) 岩石薄片中矿物百分含量图案

(据 黑田吉益)

附录2 常见透明矿物光性鉴定简表

本表的编排按矿物光性分为：均质矿物、一轴晶矿物、二轴晶矿物，矿物基本依折射率数值自低到高排列，均质矿物以 N 为准，一轴晶矿物以 N_o 为准，二轴晶矿物以 N_m 为准。对于同类矿物则排列在一起，以本类中折射率最低的矿物为代表排出次序。

(一)均质矿物

矿物名称(分子式、晶系)	N	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光	干涉色	鉴定特征及其他
蛋白石 ($SiO_2 \cdot nH_2O$)	1.406～1.460	负高	无色、灰、浅褐	无固定形状，非晶质体	全消光	因内应力作用，边缘可出现灰色干涉色	无固定形状、无解理、负高突起为其主要特征
萤石 CaF_2 等轴	1.433～1.435	负高突起，糙面显著	无色、浅绿、淡紫	不规划粒状充填在其他矿物之间，{111}解理，交角60°左右	全消光		均质体全消光，负高突起，具有完全的{111}解理，是萤石的主要特点；薄片中常见的紫色斑点也是特征
方沸石 $Na(AlSi_2O_6)H_2O$ 等轴	1.479～1.493	负低突起	无色透明	不规则粒状，{111}不完全解理	全消光	因失水可显微弱干涉色	均质体，折射率低，镜下可见六角形、八角形等晶体轮廓或不规则粒状充填于孔隙中，有光性异常时可为二轴晶负光性，$2V=85°$
火山玻璃 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等非晶质	1.48～1.61	负低正中	无色、灰、淡红、淡黄、淡褐	无定形，无解理，有时可有珍珠状裂理	全消光		火山玻璃易同蛋白石相混，它们的区别是：蛋白石的折射率较低。此外，火山玻璃常有脱玻化现象
方钠石 $Na_8(AlSiO_4)_6Cl_2$ 等轴	1.484～1.487	负低突起	无色、浅粉、浅黄、蓝	通常为不规则的圆形粒状，{110}解理中等	全消光	在包裹体附近可见到微弱干涉色，但罕见	均质性和明显的负低突起为主要特征，与萤石的区别是：萤石的折射率较低，解理更清楚
黝方石 $Na_8(AlSiO_4)_6SO_4$ 等轴	1.480～1.495	负低突起	无色或略带蓝色	菱形十二面体、圆柱状薄片，有明显的熔蚀港湾状，{110}解理不完全	全消光	在包裹体附近有很弱的异常干涉色	负低突起，黑褐色边缘和格子状排列的钛铁矿及熔蚀现象为特征
白榴石 $KAlSi_2O_6$ 正方	1.508～1.511	负低突起，糙面不显著	无色	四角三八面体，熔蚀后呈浑圆形；常有呈环带状、放射状排列的包裹体，薄片中不见解理	近于全消光		薄片下八面体形态或浑圆形，负低突起，弱双折射率，相互交错的聚片双晶，环带状排列的包裹体为鉴定特征

(一)均质矿物

矿物名称（分子式、晶系）	N	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光	干涉色	鉴定特征及其他
尖晶石 $(Mg,Fe,Zn,Mn)(Al,Cr,Fe)_2O_4$ 等轴	1.719～2.12	正极高突起，糙面非常显著	贵尖晶石无色，镁铁尖晶石绿色、蓝绿色，铬尖晶石绿色、红褐色、黄褐色	晶体呈八面体，中断面呈三角形、四边形、六边形	全消光	个别变种可有微弱干涉色	晶形、颜色、高突起、均质性为特征
方镁石 MgO 等轴	1.736	正高突起	无色透明，有时为褐色，随铁离子的进入，颜色由白到黄褐	镜下为圆形或不规则状，也出现方形、三角形、四边形、六边形、菱形断面	全消光		常以立方体解理、均质性、高突起等特点识别之，易与尖晶石混淆，区别是：尖晶石无解理或解理发育不好
镁铝榴石	1.738	正高突起，略比其他石榴石低	淡红至褐色	常无完好晶形，无解理，裂纹发育	全消光		折射率低于其他石榴石，不显光性异常，常有次变边并结合产状可与其他种属区别
铁铝榴石 $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	1.776～1.830	极正高突起	浅红色至浅褐色	菱形十二面体或四角三八面体，薄片中呈较规则的多边形轮廓，无解理	全消光		以折射率较高、产状同镁铝榴石区别。据其颜色及无光性异常，可同钙质系列的石榴石区别
锰铝榴石 $Mn_3Al_2(SiO_4)_2$ 等轴	1.790～1.815	极正高突起	无色或为浅红、灰褐色，有时有环带	菱形十二面体，四角三八面体，薄片中常见多边形外形，无解理	全消光	有时可见弱干涉色	据颜色及产状可以辨别。同铁铝榴石很相似，需精确测定折射率、比重及化学分析方能区分
钙铝榴石 $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ 等轴	1.735～1.770	正高突起	无色或浅褐色、黄色	菱形十二面体或四角三八面体，薄片中呈有规则的轮廓，也可呈不规则粒状，无解理	小晶粒全消光	有异常干涉色	在钙质石榴石系列中，钙铝榴石的折射率最低。在薄片中往往为无色，且常呈光性异常。同镁铝榴石的折射率相近，但后者在薄片中常为浅红色、褐色，可区别
钙铁榴石 $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$ 等轴	1.811～1.895	极正高突起	褐、黄、红色，较其他石榴石为深。颜色与 Ti、Mn 含量有关	菱形十二面体，四角三八面体，薄片中具完好的多边形，并常有明显的环带构造，无解理	约 800℃ 时全消光	有异常干涉色，可达一级灰	颜色较深，折射率高，光性异常明显，常有环带构造，可以此区别于其他石榴石

(一)均质矿物

矿物名称（分子式、晶系）	N	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光	干涉色	鉴定特征及其他
钙铬榴石 $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$ 等轴	1.850～1.860	极正高突起	绿色	菱形十二面体，四角三八面体，切面常为多边形，无解理		常有光性异常现象，可出现带状构造	标本同薄片均为绿色．切面为六边形或其他多边形，常具光性异常．镁铁尖晶石的断面为三角形、四角形、四边形，无光性异常．可与之相区别
黄绿石(烧绿石) $(Ca,Na)_2(Nb,Ta)_2O_6(F,OH,O)$ 等轴	1.93～2.18	极正高突起	黄、褐、红褐，少数可为无色	八面体晶形，有时为不规则粒状，{111}解理不完全	全消光	有时有微弱的干涉色	据八面体晶形、均质性和极正高突起可与其他铌钽矿物相区别．钙钛矿为立方体晶形，但折射率较高可与它区别开来
细晶石 $(Ca,Na)_2(Ta,Nb)_2O_6(O,OH,F)$ 等轴	1.925～2.023	极正高突起	无色或黄灰，金黄色变生的变种颜色很深	晶形为八面体、四角三八面体等，矿物颗粒较小，无解理	一般为全消光	未变生的可出现异常干涉色	据晶形、均质性、颜色以及高突起可与其他铌钽矿物区别
方钍石 ThO_2 等轴	2.20	极正高突起	红褐至褐色	晶体为立方体，带有八面体的小晶面，一般产出呈圆粒状，{100}立方体解理，不完全，有强放射性	全消光		晶形、颜色、强放射性为其特点，钙钛矿的相对密度较小，折射率较高，可与之相区别
钙钛矿 $CaTiO_2$ 假等轴(单斜)	2.34～2.38	极正高突起	无色、黄色至深褐色颜色，常呈环带状分布，有弱多色性，反射光下具金刚光泽	晶体为立方体或八面体，立方体解理不完全，但在粗大晶体上则显著	小晶体全消光	大颗粒可有弱的双反射，并呈现聚片双晶	据晶形、极高突起、颜色和弱的双折射率鉴别，有时双晶也是一个特征，和金红石的区别在于金红石具有极大的双折射率、金红色、平行消光等特点

(二)一轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
霞石 $(Na,K)AlSiO_4$ 六方	$N_o=1.529\sim1.549$ $N_e=1.526\sim1.543$ $(-)N_o-N_e=0.003\sim0.005$	正低或负低	无色透明，但由于风化产物的存在而呈浑浊的浅灰色	晶体为六方短柱状、厚板状，柱面解理和底面解理均不完全，薄片常见不规则裂纹	柱状切面具平行消光，六边形底面则为全消光	干涉色低、不超过一级灰	负延性	双折射率低，不完全解理，一轴负晶及易溶于 HCl 为鉴定特征。注：负光性，有时为光性异常
方柱石 $(Na,Ca,K)_4[Al(Si,Al)Si_2O_3]_3(Cl,CO_3,SO_4)$ 正方	$N_o=1.535\sim1.607$ $N_e=1.533\sim1.568$ $(-)N_o-N_e=0.002\sim0.039$	负低中突起	无色	呈柱状，薄片中常呈柱状或叶片状集合体。沿柱面解理完全，呈数量众多的细小裂隙	平行柱面为平行消光	富含钙柱石分子者呈二级至三级干涉色，钠柱石极低	负延性	方柱石与其相似的斜长石及堇青石的区别是一轴晶、无双晶、平行消光。注：纯的钠柱石为一轴正晶，方柱石为负光性
石英 α・SiO_2 三方 β・SiO_{11} 六方	$N_o=1.544$ $N_e=1.553$ $N_e-N_o=0.009$	正低突起	无色透明	六方柱与菱面体组成的聚形，六方柱与六方双锥组成的聚形，无解理	柱状轮廓者为平行消光，应力作用可见波状消光	一级灰白，最高为一级黄白	柱状晶体为正延性	低正突起，无解理，表面光滑，无色透明无风化产物，一级灰白干涉色和一轴正晶为其鉴定特征。注：有时因应力作用成为二轴晶。$(+)2V=8°\sim12°$
方英石 SiO_2 正方	$N_o=1.489$ $N_e=1.482$ $(-)N_o-N_e=0.007$	负低突起	无色透明，偶尔带有浅灰、浅黄色	常为小的板状体，薄片中呈方形，鳞片状	平行消光，有时有小角度的斜消光	一级暗灰干涉色	{111}尖晶石型双晶，还可有聚片双晶，延性可正可负	易同鳞石英混淆，区别在于：方英石有弯曲的断口，一轴负晶，而鳞石英的折射率较低，二轴晶正光性
玉髓（石髓）SiO_2 三方	$N_o=1.530\sim1.533$ $N_e=1.538\sim1.543(+)$ $N_e-N_o=0.008\sim0.010$	负低突起	无色、黄色或浅褐色（系氧化铁染成）	隐晶质集合体为放射状、纤维状、无解理	平行消光	一级灰白	可正、可负	特征为突起甚低和纤维状，放射状集合体，且为平行消光。注：一轴正晶，但有时可为二轴晶
水镁石（氢氧镁石）$Mg(OH)_2$ 六方	$N_o=1.559\sim1.590$ $N_e=1.538\sim1.600(+)$ $N_e-N_o=0.10\sim0.021$	正低中突起	无色透明	厚板状，但通常为叶片状、鳞片状或纤维状集合体，{0001}完全解理	平行消光	一级橙黄，呈类似烟草的红褐色，异常的干涉色	负延性	一轴晶、负延性、异常干涉色为其特征。注：有时可为二轴晶，2V 很小，可能为应力所致

(二)一轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
绿柱石 $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ 六方	$N_o=1.568\sim1.608$ $N_e=1.564\sim1.600$ $(-)N_o-N_e=$ $0.004\sim0.008$	正低中突起	无色,厚切片中有微弱多色性	六方柱状,有不明显的{0001}解理	平行消光	一级灰色,最高一级淡黄	负延性,但板状晶体为正延性	中正突起、一轴负晶、负延性等为特征,易同石英混淆,区别是绿柱石的突起稍高,干涉色,负光性,负延性。注:柱面切面,可见环带构造,边部为二轴晶
磷灰石 $Ca_5(PO_4)_3$ (F,Cl,OH)六方	$N_o=1.629\sim1.667$ $N_e=1.624\sim1.666(-)$ $N_o-N_e=$ $0.001\sim0.005$	正中突起	一般无色,有时带微弱的不均匀的粉红、褐、浅蓝等并且多色性	六方柱状、针状,{0001}解理不完全	柱状切面呈平行消光,横切面全消光	一级灰	负延性,板状晶体则可能为正延性	以正中突起,完好的六边形晶形,{0001}解理,一级灰干涉色,平行消光,负延性可区别于大多数浅色矿物。注:有异常二轴晶,$2V>10°$
明矾石 Ca,$Al_3(SO_4)_2$ $(OH)_6$ 三方	$N_o=1.572$ $N_e=1.592$ $(-)N_e-N_o=0.020$	正中突起	薄片中无色	平行{0001}的板状或假立方体状的菱面体,常为细粒或粗粒集合体,或薄片状、纤维状	平行消光或对称消光	二级蓝	底切面负延性	有时与白云母相似,区别是其 N_p 平行于解理缝,双折射率不高于0.020。而白云母为0.037~0.041,且为二轴晶,也可以此与绢云母区别,且绢云母晶粒细小,正延性
黄长石 $Ca_2(Al,Mg)$ $[(Si,Al)_2O_7]$ 正方	$N_o=1.632\sim1.669$ $N_e=1.639\sim1.658$ $(-)N_o-N_e=0.011$ $(+)N_e-N_o=0.007$	正中高突起	无色或淡黄棕色,厚薄片中可有多色性:N_o—黄褐;N_e—无色至淡黄	四方的板状或短柱状,具"钉齿构造",是由和条状切面延长方向相垂直的短裂缝排布于边缘所造成。{011}中等解理,{110}不好	平行消光	一级灰至黄,常有异常干涉色	大部分为正延性,较少部分为负延性	突起较高,干涉色低,有异常蓝是其特征,黝帘石虽也有异常干涉色,但其解理发育,无色透明,二轴晶。注:铝黄长石为一轴负晶,镁黄长石为一轴正晶

(二)一轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
黑电气石 $NaFe_3Al_6[(BO_3)_3Si_6O_{18}](OH)_4$ 三方	$N_o=1.655\sim1.675$ $N_e=1.625\sim1.650$ $(-)N_o-N_e=0.025\sim0.034$	正中一高突起，糙面显著	颜色变化大，可显灰、灰褐、肉色、蓝、蓝绿、橄榄绿、紫、黑等	短柱状、长柱状，解理少见，有垂直C轴的裂理	平行消光	最高可达二到三级，受颜色影响，较难辨别真面目	双晶少见，负延性	与黑云母和角闪石有些相似，区别是：黑云母的解理极好，角闪石具有两组相交124°的解理。注：可呈具很小光轴角的二轴晶，$2V=5°\sim10°$
镁电气石 $NaMg_3Al_6[(BO_3)_3Si_6O_{18}](OH)_4$ 三方	$N_o=1.635\sim1.661$ $N_e=1.610\sim1.632$ $(-)N_o-N_e=0.021\sim0.026$	正中突起	肉色、肉黄色或黄色，经常有颜色环带，柱状，切面多色性显著	柱状、锥状晶形，解理不发育，但具垂直C轴的横裂理	平行消光	一级顶部到二级中部，有时因多色性难以辨别	双晶少见，负延性	干涉色较电气石低，多色性和吸收性也较弱。注：无光性异常
锂电气石 $Na(Li,Al)_3Al_6(BO_3)_3[Si_6O_{18}](OH)_4$ 三方	$N_o=1.640\sim1.655$ $N_e=1.615\sim1.620$ $(-)N_o-N_e=0.017\sim0.024$	正中突起	无色或具极淡的色调，多色性比其他电气石弱	三方柱和六方柱组成的聚形，无解理，有垂直C轴方向的裂理	平行消光	一级顶部到二级底部	负延性	在电气石类矿物中锂电气石颜色最浅，有时颇似磷灰石，但磷灰石的干涉色低。一般为一级灰，而镁电气石总是在一级以上。注：偶见光轴角很小的二轴晶
方解石 $CaCO_3$ 三方	$N_o=1.658$ $N_e=1.486$ $(-)N_o-N_e=0.172$	N_o 为正中一高突起，N_e为低负突起，闪突起十分显著	无色	菱形晶体或偏三角面体和菱面体的聚形。{1011}极完全解理，垂直解理面时交角为75°	沿解理方向对称消光	高级白	聚片双晶和接触双晶，负延性	无色透明有菱形解理及显著的闪突起，高级白干涉色，一轴负晶等为特征。注：应力作用可使方解石具异常的二轴晶和不对称消光
菱锰矿 $MnCO_3$ 三方	$N_o=1.816$ $N_e=1.597$ $(-)N_o-N_e=0.219$	闪突起显著，N_o 高正突起，N_e 低正突起	无色、浅粉红色、青灰色	粒状、柱状、皮壳状、肾状集合体。		高级白	聚片双晶，但少见，负延性	具典型的浅粉红色

(二)一轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
白云石 $Ca,Mg(CO_3)_2$ 三方	$N_o=1.679$ $N_e=1.500$ $(-)N_o-N_e=0.179$	闪突起显著	无色，有时呈混浊的灰色	菱面体，晶面常呈马鞍状，常可见到两组相交的解理缝	对解理纹呈对称消光，弯曲晶体具波状消光	高级白	双晶常见，双晶纹平行菱形解理的短对角线	与方解石的区别是：双晶往往弯曲[022]，双晶平行菱面体短对角线，并常见到带状构造，加酸不起泡。注：因应力作用有时可呈异常二轴晶
菱铁矿 $FeCO_3$ 三方	$N_o=1.875$ $N_e=1.633$ $(-)N_o-N_e=0.242$	闪突起不显著	无色、青灰色或浅黄褐色，边缘因风化，有黄色锈斑	晶形为菱面体，常呈粒状、细粒状、柱状、板状、球粒状，菱面体解理	沿解理线对称消光	高级白薄片中矿物边缘可呈较鲜艳的色彩	聚片双晶，双晶同菱形解理的长对角线平行	薄片中无色或带浅褐色[0001]，双晶不常见，但有时见[0112]聚片双晶，可与菱镁矿区别。与其他碳酸盐矿物的区别是氧化铁所形成的外壳
菱镁矿 $MgCO_3$ 三方	$N_o=1.700$ $N_e=1.509$ $(-)N_o-N_e=0.190$	闪突起显著	无色	菱面体晶体，或柱状、板状、粒状等。薄片中通常无较好晶形，菱面体解理完全	沿解理线对称消光	高级白	无双晶，负延性	与方解石、白云石的区别在于菱镁矿的折射率较大，不见聚片双晶，菱镁矿遇冷的稀盐酸不起泡
符山石 $Ca_{10}(MgFe)_2Al_4[Si_2O_7]_2[SiO_4]_5(OH,F)_4$ 正方	$N_o=1.705\sim1.738$ $N_e=1.701\sim1.732$ $(-)N_o-N_e=0.004\sim0.006$	正高突起糙面显著	无色、浅绿、浅棕，有时为玫瑰色和浅紫色	呈带正方双锥的柱状晶体，横切面为正方形，{110}柱面解理不完全，{001}极不完全	平行消光	一级灰，但干涉色极不均匀，并可有异常干涉色，黄褐、深蓝、浅紫	负延性	横切面常呈正方形或有颜色的带状集合体，正高突起，双折射率低，多为一轴负晶为特征。注：通常为一轴负晶，较少情况下为一轴正晶。呈异常为二轴晶。$2V=17°\sim33°$

(二)一轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
磷钇石 YPO_4 正方	$N_o=1.721$ $N_e=1.816$ $(+)N_e-N_o=0.095$	正高突起	无色透明或为浅黄褐色，有弱多色性；N_o—玫瑰色，N_e—褐黄色	四方柱和四方双锥的聚形，{100}解理完全，{110}解理中等	柱状切面为平行消光	高于四级，并呈带状分布	{101}双晶，柱状切面为正延性	短柱状晶形，正高突起，完全解理为其特征。最容易同锆英石相混，区别是：(1)锆英石的晶形为长柱形，磷钇矿为短柱状；(2)锆英石的柱面解理不完全；(3)锆英石的折射率较高，双折射率低
刚玉 Al_2O_3 三方	$N_o=1.767\sim1.772$ $N_e=1.759\sim1.763$ $(-)N_o-N_e=0.008\sim0.009$	正高极高突起，糙面显著	无色或其他颜色（变种）	桶状、锥状、板状、柱状，无解理、有裂理	平行于晶体轮廓或对称于菱形裂理	干涉色与石英相似，但因厚度较大而呈二级蓝	聚片双晶较常见，板状晶体为正延长，柱状晶为负延长	突起很高，一级干涉色是其特征，同时以硬度大、相对密度大、晶形特殊，不溶于酸也可识别。注：有时可成二轴晶
钍石 $Th[SiO_4]$正方	$N_o=1.80$ $N_e=1.81$ $(+)N_e-N_o=0.01$	正极高突起	黄色、褐色，常有黑色斑点	晶体多呈四方柱和双锥的聚形，一般常为细粒状，{110}解理清楚		一级灰、黄或红色		与锆英石相似，可据共强放射性及镜下呈变生均质性等特征鉴别。注：因放射性破坏晶格发生变生作用，显均质性
白钨矿（钨酸钙矿）$CaWO_4$ 正方	$N_o=1.918$ $N_e=1.934$ $(+)N_e-N_o=0.016$	正极高突起	无色	呈四面双锥状或板状晶体，常呈致密块状，沿//{111}完全解理，{101}不完全		一级顶部	沿{100}或{110}双晶	在紫外光、X射线、阴极射线下发明亮的蓝白色萤光
锆英石（锆石）$Zr[SiO_4]$	$N_o=1.923\sim1.960$ $N_e=1.968\sim2.015$ $(+)N_e-N_o=0.044\sim0.062$	正极高突起	无色或灰黄，淡橙色，有时为粉红、浅紫色	四方和四方双锥组成的聚形，{110}柱面解理不完全	平行消光	呈鲜艳的红、绿、蓝色	沿{111}双晶，但少见，正延性	正极高突起，三～四级干涉，常见有四角形的横切面，一轴正晶是其特点。注：放射性蜕变呈非晶质化，光性有时异常

(二)一轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
金红石 TiO_2 正方	$N_o=2.616$ $N_e=2.903$ (+)$N_e-N_o=0.387$	正极高突起	浅红、浅黄、紫色，具多色性，但不显著	晶体为长柱状、针状及纤维状，有明显的{110}和{100}解理	平行消光	高级白，常混杂有矿物本身的颜色，针状者呈现蓝、红、紫干涉色	膝状双晶和心形双晶，针状、柱状晶体呈正延性	极高的突起红褐色，反射光下具金刚光泽和极大的双折射率，有清楚的柱状解理为特征，与锡石和锆英石相似，但锡石与锆英石的干涉色、折射率、双折射率较低。注：因双晶或应力变形可产生异常二轴晶
锡石 SnO_2 正方	$N_o=1.992\sim1.997$ $N_e=2.091\sim2.093$ (+)$N_e-N_o=0.097$	正极高突起，突起和糙面十分明显	无色、黄色、橙色、褐色、绿色，颜色分布常呈带状，深色变种有明显多色性	晶体呈双锥柱状，柱状解理不完全，有时有裂理	对于解理具平行消光，对双晶面则为斜消光	高级白，并有彩色光泽	聚片双晶和膝状双晶，正延性	容易和金红石混淆，区别是金红石在薄片中通常为暗红褐色，而锡石为浅色。注：某些变种为二轴晶正光性
锐钛矿 TiO_2 正方	$N_o=2.561$ $N_e=2.488$ (−)$N_o-N_e=0.073$	正极高突起，糙面显著	无色、浅黄、浅褐色，有弱多色性	常为尖锐的长双锥状或板状、柱状、粒状，薄片中常为长方形、四方形和菱形切面，{001}和{111}解理完全	对于晶体轮廓常为平行消光或对称消光	干涉色很高，可达四级或四级以上	双晶少见，负延性	尖锐的双锥状晶形，正突起很高，一轴负晶是其特征。同金红石的区别是：金红石为一轴正晶，柱状、针状晶形。注：暗色变种可能为光轴角很小的二轴晶

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
硼砂 $Na_2[B_4O_5(OH)_4]$ $8H_2O$ 单斜	$N_p=1.447$ $N_m=1.469$ $N_g=1.472$ $N_g-N_p=0.025$ $(-)2V=39°\sim40°$	柱状或板状晶体，{100}解理完全，{110}次之	无色	负中突起		二级，在垂直光轴切面上，有蓝或棕的异常干涉色	（100）双晶，罕见	低折射率，负中突起
鳞石英 SiO_2 斜方	$N_p=1.471\sim1.482$ $N_m=1.472\sim1.483$ $N_g=1.474\sim1.488$ $N_g-N_p=$ $0.002\sim0.004$ $(+)2V=35°\sim90°$	晶体呈假六方片状、花瓣状、扇形、网状、球状、叠瓦状集合体，柱面解理较差，不常见	无色透明	负高突起	条状晶体平行消光	一级黑灰	双晶常呈一端厚一端薄的楔形，一个鳞石英颗粒包括2～3个单位，负延性	鳞石英可溶于沸腾的碳酸钠中，其光性与方英石极相似，区别为正光性，折射率较低，晶形呈六边形，并常见有双晶是其特征，而方英石的折射率略高，大于1.484，呈四边形，准确鉴定需用X光粉末照相
高岭石 $Al_4[Si_4O_{10}]$ 单斜、三斜	$N_p=1.553\sim1.563$ $N_m=1.559\sim1.569$ $N_g=1.560\sim1.570$ $N_g-N_p=0.007$ $(-)2V=42°$	晶粒很小很细，一般小于1mm，呈假六方板状、鳞片状、蠕虫状，{001}解理完全常呈弯曲状	无色至浅黄色	低正突起	在(001)面上近于均质，(010)面上为斜消光	一级灰白	无双晶、正延性	与蒙脱石的区别在于折射率较高，正突起，干涉色低为一级灰白；而蒙脱石为负突起，双折射率较高，为二级左右，可以区别
多水高岭石（埃洛石） $Al_4[Si_4O_{10}]$ $(OH)_8 4H_2O$ 单斜	$N_m=1.528\sim1.542$ $N_g-N_p=$ $0.000\sim0.004$	晶体极微细，颇似非晶质，为致密状，土状鲵状，但在高倍镜下或在电镜下均可见，为棒状、骨状、长板状、针状集合体	无色	负低或低正突起，很不明显	有很小消光角的斜消光	很低，几乎为均质	无双晶负延性	与高岭石较难区别，但多水高岭石的双折射率极低，还可根据差热分析以及电子显微镜下的不同特征予以区别，多水高岭石为棒状集合体，高岭石多为假六方片状

(三)二轴晶矿物

矿物名称 (分子式、晶系)	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
地开石 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ 单斜,三斜	N_p=1.560~1.562 N_m=1.562~1.564 N_g=1.566~1.569 N_g-N_p= 0.006~0.007 (+)$2V$=66°	晶体呈假六方板状、叶片状、鳞片状等,{001}解理完全	无色	低正突起	斜消光在平行{010}切面上可有大于高岭石较多的消光角($N_m\wedge X$=12°~20°	一级灰白	正延性	地开石的光性同高岭石极为相似,不同处在于地开石的结晶较为粗大,消光角较大,正光性,而高岭石为负光性,消光角较小:$N_m\wedge X$=2°~4°
珍珠陶土 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ 单斜,三斜	N_p=1.557~1.560 N_m=1.562~1.566 N_g=1.563~1.568 N_g-N_p= 0.006~0.008 (−)$2V$=40°或 (+)$2V$=90°	板状、假六方鳞片状或放射薄片状集合体,{001}完全,{010}、{110}较好	无色	低正突起	斜消光	一级灰白	可有{110}为结合面的三连晶,正延性	珍珠陶土和地开石很难区分,只有用X射线粉晶法才能准确鉴定
蒙脱石 (微晶高岭石) (胶岭石) $(Na,Ca)_{0.33}$ $(Al,Mg)_2[Si_4O_{10}]$ $(OH)_2\cdot nH_2O$ 单斜	N_p=1.475~1.503 N_m=1.499~1.533 N_g=1.500~1.534 N_g-N_p= 0.025~0.031 (−)$2V$=7°~25°	结晶较细,呈蠕虫状、页片状、球状、毡状、粒状集合体,呈致密块状、鳞片状	无色,有时有浅黄、浅绿、浅粉等色	负低突起	近于平行消光	最高干涉色可达二级,但因鳞片很薄,一般不超过一级	正延性	与高岭石的区别是折射率较低,负低突起(高岭石为低正突起),双折射率较高;与水白云母的区别是负突起,遇水膨胀成糊状,而水白云母的折射率、双折射率均较大,正突起二级干涉色,蒙脱石的差热分析也很有特征,可据之区别于高岭石、水白云母等其他粘土矿物

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
绿脱石(绿高岭石)（本脱石）$Na_{0.33}Fe_2(Al_4Si)_4O_{10}(OH)$ nH_2O 单斜	$N_p=1.567\sim1.600$ $N_m=1.604\sim1.632$ $N_g=1.605\sim1.640$ $N_g-N_p=0.038\sim0.040$ $(-)2V=25°\sim68°$	呈隐晶致密块状或土状集合体或球状、鱼籽状、扇状、羽状、鳞片状集合体，{001}底面解理完全	白、黄、绿、褐黄、红、黑色，薄片中无色或绿至黄色，多色性显著	低—中正突起	近于平行消光	二级	正延性，一般为负延性，有时正光性，光轴角不大，有时也较大	绿色、黄绿色是粘土矿物中该矿物的重要特征，与绿泥石区别是其双折射率较大，与蒙脱石及高岭石的区别为折射率高，蛭石的折射率及双折射率均较小，绿帘石的折射率较大，无{001}解理，均与绿脱石有别
水白云母（伊利水云母）$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Al,Si)_4O_{10}[(OH)_2H_2O]$ 单斜	$N_p=1.577\sim1.606$ $N_m=1.580\sim1.610$ $N_g-N_p=0.025\sim0.035$ $(-)2V=5°\sim10°$（最大40°）	呈鳞片状、碎片状、羽毛状集合体，常与高岭石交生成席状，{001}解理完全，集合体呈蠕虫状	白色，无色，绿色，薄片中无色，有时略带浅绿、浅黄褐色	低—中正突起	近于平行消光	达二级底部到中部	正延性	与白云母的区别是折射率较低，2V较小(5°±)，而白云母2V中等高岭石的折射率及双折射率较低，蒙脱石为负突起，绢云母有较大折射率，无色的绿泥石双折射率较小，均可与之区别。再之，差热分析：在100～150℃，450～600℃有一吸热谷，900～1000℃有一小的吸热谷与放热峰
石膏 $CaSO_4 2H_2O$ 单斜	$N_p=1.520\sim1.521$ $N_m=1.522\sim1.523$ $N_g=1.529\sim1.530$ $N_g-N_p=0.009\sim0.010$ $(+)2V=58°$随温度升高2V可增大	呈平行{010}的板状或柱状，亦常有粒状、板状、片状和纤维状及土状集合体，{010}解理完全，{100}、{011}清楚	常为白色、无色，有时灰、红、蓝、褐色，薄片中无色透明	低负突起	垂直(010)面上为平行消光，平行(010)面上为斜消光	和石英相似，常为一级白到一级淡黄	{100}为结合面的燕尾双晶常见，{101}不常见，延性可正可负	以其晶形，一组完全解理和稍差的两组解理，以及低突起弱干涉色为特征，其易与硬石膏相混，其区别为硬石膏为低正突起和双折射率较高，并有假立方体解理可区别

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
透长石 (K,Na)$AlSi_3O_8$ 单斜	$N_p=1.518\sim1.525$ $N_m=1.522\sim1.530$ $N_g=1.525\sim1.532$ $N_g-N_p=0.005\sim0.007$ $(-)2V=0°\sim63°$	厚板状或短柱状，断面六边形，{011}、{010}完全解理，{001}∧{010}=90°	无色，因风化而带混浊的灰色或肉红色	负低突起	(001)面上平行消光，(010)面上斜消光，消光角很小	一级灰至灰白色	通常不发育双晶，有时有卡斯巴双晶等，沿解理方向为负延性	与石英相似，区别是负突起，二轴负晶可见解理，与霞石的区别是折射率、双折射率都略高，而且是二轴晶，与其长石种属的区别在于2V较小，有时颇似一轴晶干涉图
正长石 $KAlSi_3O_8$ 单斜	$N_p=1.516\sim1.529$ $N_m=1.522\sim1.533$ $N_g=1.523\sim1.539$ $N_g-N_p=0.005\sim0.008$ $(-)2V=44°\sim84°$	柱状厚板晶状，常与石英呈文象蠕虫状交生，与钠长石组成条纹，{001}∧{010}=90°	无色，因风化而带混浊的灰色或肉红色	负低突起	斜消光，消光角很小	一级灰白	常发育卡斯巴双晶，有时见巴温洛曼尼巴双晶，不出现聚片双晶，负延性	与石英的区别是有解理和双晶，表面常混浊，负突起和二轴晶，与斜长石的区别是不具聚片双晶，与微斜长石区别是后者具格子状双晶，与霞石之区别是有双晶
微斜长石 $KAlSi_3O_8$ 三斜	$N_p=1.516\sim1.523$ $N_m=1.522\sim1.528$ $N_g=1.523\sim1.530$ $N_g-N_p=0.007$ $(-)2V=44°\sim84°$	常为不规则粒状，常与钠长石构成条纹，成微斜条纹长石，解理{001}∧{010}=89°40′	无色透明，表面常呈混浊的浅红褐色	负低突起	斜消光，消光角较小，N_p∧(010)=18°	一级灰至灰白色	常发育纺垂状的格子状双晶，有时有卡斯巴双晶，可与石英或正长石构成文象结构，可正可负	与正长石极为相似，可据微斜长石的格子双晶和2V大于正长石，此外还可根据消光角和解理夹角相区别

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
钠长石 $NaAlSi_3O_8$ 三斜	$N_p=1.529\sim1.533$ $N_m=1.533\sim1.537$ $N_g=1.539\sim1.542$ $N_g-N_p=$ $0.009\sim0.010$ $(+)2V=45^\circ\sim83^\circ$	晶体呈板片状或条状，{001}完全解理，{010}较完全，(001)∧(010)=86°	无色透明	负低突起	斜消光，消光角较小	一级灰至灰白	聚片双晶，双晶带数目较少，也不似更长石细密，负延性	与钠长石的区别是：钠长石为正光性并为聚片双晶，与石英的区别是石英无双晶，无解理一轴晶
更长石 $(Na,Ca)Al$ $(Al,Si)Si_2O_8$ 三斜	$N_p=1.533\sim1.545$ $N_m=1.537\sim1.548$ $N_g=1.542\sim1.552$ $N_g-N_p=$ $0.007\sim0.009$ $(\pm)2V=82^\circ\sim83^\circ$	短柱状或为矩形，平行(010)的板状晶体，{001}解理完全，{010}良好，{110}差	无色透明	负低—正低突起	斜消光，但消光角在斜长石类中最小，{001}解理面上消光角0°～3°	一级灰至灰白色	钠长石双晶最常见，有时还具有肖钠双晶，双晶带极细密平直，负延性	更长石的光性特征是具有细密平直的聚片双晶，并近于平行消光，更长石可根据消光角、折射率以及2V等光性数据区别于斜长石类其他种属。注：二轴正晶或负晶，高温更长石为负光性
中长石 $(Na,Ca)Al$ $(Al,Si)Si_2O_8$ 三斜	$N_p=1.545\sim1.555$ $N_m=1.548\sim1.558$ $N_g=1.552\sim1.562$ $N_g-N_p=$ 0.0075 $(\pm)2V=77^\circ\sim83^\circ$	短柱状、板状断面则常呈矩形的轮廓，中长石具有环带构造，解理{001}完全，{010}良好	无色	正低突起	斜消光，消光角不大	一级灰白	(010)聚片双晶常见，其他双晶如肖钠双晶、卡斯巴双晶、巴温诺双晶等也常见，负延性	中长石以其较高的折射率和经常具有的环带构造和卡钠复合双晶区别于钠长石，与其他斜长石的光性鉴别主要根据消光角和折射率值。注：二轴正晶或负晶

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
拉长石 (Ca,Na)Al(Al,Si)Si_2O_8 三斜	$N_p=1.555\sim1.563$ $N_m=1.558\sim1.568$ $N_g=1.562\sim1.573$ $N_g-N_p=0.0075\sim0.0095$ $(+)2V=77°\sim86°$	板状或柱状晶体，解理{001}完全，{010}良好	无色	正低突起	斜消光，(001)解理上消光角为6°～16°，{010}解理面为17°～29°	一级灰至灰白色	卡钠复合双晶、钠长双晶、肖钠双晶常见，其他双晶也有，双晶带则较宽，负延性	以其较大的双折射率值及消光角等数值可与其他斜长石相区别。注：二轴负晶
倍长石 (Ca,Na)Al(Al,Si)Si_2O_8 三斜	$N_p=1.563\sim1.572$ $N_m=1.568\sim1.578$ $N_g=1.573\sim1.584$ $N_g-N_p=0.0095\sim0.012$ $(\pm)2V=79°\sim86°$	晶形为板状、柱状，通常则多呈半自形或他形粒状产出，{001}完全，{010}良好	无色透明	正低突起	斜消光	一级黄白	常见钠长双晶、肖钠双晶、卡钠复合双晶，双晶带宽，负延性	根据较高的折射率、双折射率和消光角可与其他斜长石相区别。注：大多为二轴负晶，也有正光性
钙长石 $CaAl_2Si_2O_8$ 三斜	$N_p=1.572\sim1.575$ $N_m=1.578\sim1.580$ $N_g=1.584\sim1.588$ $N_g-N_p=0.012\sim0.0135$ $(-)2V=77°\sim79°$	柱状晶体，常见为他形晶，但也可有自形晶产出，{001}完全，{010}良好	无色透明	正低突起	斜消光	一级黄，双折射率是斜长石中最高的	常见钠长双晶、肖钠双晶，双晶带很宽，负延性	钙长石的双晶比较有特征，在所有斜长石中，其折射率、双折射率以及消光角都是最大的，故可据此与其他斜长石区别。注：全部为负光性，$(-)2V=77°\sim79°$

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
堇青石 $Mg_2Al_3(AlSi_5O_{18})$ 斜方	$N_p=1.530\sim1.560$ $N_m=1.535\sim1.574$ $N_g=1.538\sim1.578$ $N_g-N_p=0.008\sim0.018$ $(+)2V=(-)42°\sim(+)76°$	柱状、致密块状和不规则粒状，由于三连晶及六连晶的关系，常呈假六方状，{010}解理中等，{001}、{100}差	无色透明或微浅蓝	低突起可正可负	柱面上平行消光，在具六连晶的切面上对顶的单体同时消光	和石英很相似，常见为一级黄	{110}、{130}简单双晶聚片双晶及轮生晶三连晶六连晶，{021}、{101}双晶少见，负延性	与石英的区别是可有负突起有特征的双晶，二轴晶并常有蚀变产物绢云母，堇青石内包裹体周围的多色晕圈也是一重要特征，堇青石极易与石英及长石相混。注：一般为二轴负晶 $r<V$，但也有二轴正晶，而且 $r>V$，光轴角很大
白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 单斜	$N_p=1.552\sim1.570$ $N_m=1.582\sim1.619$ $N_g=1.588\sim1.624$ $N_g-N_p=0.036\sim0.054$ $(-)2V=35°\sim50°$	通常是假六方板状、不规则的叶片状或叶片状集合体，{001}极完全	无色、浅绿、浅黄色	正低突起⊥(001)切面上可见较清晰的闪突起	近平行消光，仅有 2°～3°的消光角	在⊥(001)面上最高干涉色可达二级，顶部到三级，十分鲜艳	依云母律呈现双晶，结合面{001}双晶轴{310}薄片中不显著，有时可见贯穿三连晶	无色、片状，突起中等并具弱闪突起，平行消光，三级干涉色等都很有特征
锂云母(鳞云母) $K(Li,Al)_3[(Si,Al)_4O_{10}](F,OH)_2$ 单斜	$N_p=1.524\sim1.537$ $N_m=1.543\sim1.563$ $N_g=1.545\sim1.566$ $N_g-N_p=0.021\sim0.029$ $(-)2V=41°$	常呈厚板状或短柱状的假六方晶体，最常见的是叶片状，{001}极完全	无色	正低突起	几乎近于平行消光，消光角最大可达 6°～7°	最高干涉色二级顶部	{001}云母律双晶少见，平行解理方向为正延性	与白云母相似，区别在于折射率和双折射率略低，消光角稍大，如薄片中呈浅粉色时，可根据多色性来区别，但通常须借于焰色反应才可准确鉴别之

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
铁锂云母 $KLiFe^{2+}Al[(Si,Al)_4O_{10}](F,OH)_2$ 单斜	$N_p=1.541\sim1.551$ $N_m=1.571\sim1.578$ $N_g=1.573\sim1.581$ $N_g-N_p=0.030\sim0.032$ $(-)2V=24°$	通常呈不规则的板状、片状和鳞片状或呈扇形，{001}底面解理极完全	无色或浅褐色	正低突起	沿解理缝几乎平行消光	最高干涉色二级顶部	{001}云母律双晶，沿解理方向为正延性	与白云母的区别在于薄片中带色具多色性，与金云母的区别是铁锂云母的光轴角较大
金云母 $KMg_3[AlSi_3O_{10}](F,OH)_2$ 单斜	$N_p=1.522\sim1.568$ $N_m=1.548\sim1.609$ $N_g=1.549\sim1.613$ $N_g-N_p=0.027\sim0.045$ $(-)2V=0°\sim20°$	常呈假六方板状、叶片状晶体，晶体往往比较粗大，薄片中通常呈不规则的叶片或长条状，{001}底面解理极完全	无色至浅黄褐色	正低突起至中正突起	几乎平行于解理消光，消光角不大于5°	最高干涉色为三级，有的为二级	{001}云母律双晶通常不显著	金云母与黑云母的区别在于前者颜色较淡，多色性与吸收性较弱，而无色金云母与白云母的区别是光轴角极小
蛭石 $(Mg,Fe,Al)_3[(Al,Si)_4O_{10}](OH)_2 4H_2O$ 单斜	$N_p=1.525\sim1.561$ $N_m=1.545\sim1.581$ $N_g=1.545\sim1.581$ $N_g-N_p=0.020$ $(+)2V=0°\sim8°$	常依黑云母、金云母的假六边形为假象，呈板状或片状	无色至浅褐色	正低突起	近于平行消光	二级干涉色常受矿物本身的颜色所干扰	正延性	将标本加热剧烈膨胀是其重要特征，在光性上与相似的黑云母的区别为多色性弱，解理较差，双折射率低
黑云母 $K(Mg,Fe^{2+})_3[(Al,Fe)Si_3O_{10}](OH,F)_2$ 单斜	$N_p=1.571\sim1.616$ $N_m=1.609\sim1.696$ $N_g=1.610\sim1.697$ $N_g-N_p=0.039\sim0.081$ $(-)2V=0°\sim35°$	常呈假六方板状、片状或垂直(001)的叶片状，鳞片状，{001}解理极好	薄片中为褐黄褐色，多色性与吸收性极强	中正突起，折射率随含铁量增多而增高	通常平行消光，常为波状消光	铁低者二级，铁高者达四级，但因矿物本身干扰使干涉色混浊	{001}云母律双晶，但不常见，沿解理缝方向正延性	黑褐色多色性显著，吸收性强，片状，极完全解理等为其主要鉴别特征

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及双折射率	突起	薄片中颜色	晶形、解理	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
纤维蛇纹石(温石棉,a型) $Mg_6[Si_2O_5](OH)_4$ 单斜	$N_p=1.532\sim1.552$ $N_g=1.545\sim1.561$ $N_g-N_p=0.009\sim0.013$ $(+)2V=10^\circ\sim90^\circ$	呈细长的纤维状集合体,解理不完全	浅绿、浅黄绿、无色,可见微弱多色性	正低突起至负低突起	平行或近于平行消光,放射状纤维可呈扇形或十字形的消光	一级灰白至黄色	Q型为正延性	与绿泥石的区别是无异常干涉色
叶绿泥石 $(Mg,Fe^{2+})Al[Al,Si_3O_{10}](OH)_8$ 单斜	$N_p=1.562\sim1.581$ $N_m=1.565\sim1.581$ $N_g=1.565\sim1.586$ $N_g-N_p=0.003\sim0.005$ $(+)2V=0^\circ\sim20^\circ$ $(-)2V=2^\circ\sim40^\circ$	晶体呈较厚的六方板状,断面假六方片状常是黑云母假象,{001}解理完全	绿—黄绿,多色性明显	正低至中突起	平行或近于平行消光	一级灰,但常有蓝、紫或锈褐色的异常干涉色	有时可见{001}双晶,延性及光性相反,正光性为负延性	与蛇纹石的区别是其多色性显著,具异常干涉色;与云母的区别是颜色发绿。注:蓝紫或锈褐色的异常干涉色
硬石膏 $CaSO_4$ 斜方	$N_p=1.569\sim1.573$ $N_m=1.572\sim1.579$ $N_g=1.613\sim1.618$ $N_g-N_p=0.044\sim0.045$ $(+)2V=42^\circ\sim44^\circ$	呈厚板状或柱状,通常呈纤维状,致密块状集合体,有三组正交解理	无色透明	正低突起	平行消光	常达三级绿色	沿{101}呈简单双晶,聚片双晶或三连晶,延性可正可负	解理、干涉色及中等光轴角为其特征
滑石 $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.538\sim1.550$ $N_m=1.575\sim1.594$ $N_g=1.575\sim1.600$ $N_g-N_p=0.037\sim0.050$ $(-)2V=6^\circ\sim30^\circ$	晶体呈薄片状、鳞片状,通常为细粒的片状集合体,解理{001}完全	无色	正低突起	平行消光或小角度的斜消光(消光角为$2^\circ\sim3^\circ$)	最高干涉色为三级橙色,底面切片为一级红紫	沿{001}解理方向为正延性	与叶蜡石的区别是它的2V较小

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	鉴定特征及其他
叶蜡石 $Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.534\sim1.556$ $N_m=1.586\sim1.589$ $N_g=1.596\sim1.601$ $N_g-N_p=$ $0.046\sim0.062$ $(-)2V=53^\circ\sim60^\circ$	通常为片状、板状或纤维状集合体，解理{001}完全	无色或浅灰色	正低突起	平行消光或小角度斜消光	最高干涉色三级，平行解理切面为一级	云母律双晶，但通常不发育，沿解理方向为正延性	与滑石、白云母易混淆，区别是滑石2V较小，白云母的光轴角中等，而叶蜡石的2V在三者中最大。通常因干涉色高不易测得，需依靠化学方法
黄玉（黄晶） $Al_2(SiO_4)(F,OH)_2$ 斜方	$N_p=1.606\sim1.635$ $N_m=1.609\sim1.637$ $N_g=1.616\sim1.644$ $N_g-N_p=$ $0.008\sim0.009$ $(+)2V=44^\circ\sim66^\circ$	短柱状、粒状，{001}完全解理	无色	正中突起	柱面为平行消光，横切面为对称消光	干涉色低，颇似石英，通常为一级灰至黄	沿解理方向为负延性	黄玉以正中突起，干涉色低和二轴正晶为特征，易与石英相混，区别是石英无解理，低正突起，一轴晶
海绿石 $(K,Ca,Na)_{1\sim0.56}$ $(Fe^{3+}_{2+},Mg,Al)_{2\sim3}$ $(Si_3(Si,Al)O_{10}$ $(OH)_2nH_2O$ 单斜	$N_p=1.592\sim1.612$ $N_m=1.613\sim1.643$ $N_g=1.614\sim1.644$ $N_g-N_p=$ $0.022\sim0.032$ $(-)2V=10^\circ\sim24^\circ$	层状硅酸盐类，多呈细粒状粒状，也呈叶片状，{001}解理完全	通常呈绿色，具明显多色性，$N_g=N_m$—深黄蓝绿，N_p—黄绿	正中突起	近于平行消光，消光角最多可达2°～3°	二级干涉色，但往往为矿物本身的颜色混淆	较大晶粒可见，沿解理方向为正延性	绿色细粒状，圆形，二级干涉色及集合偏光（微晶均匀集合体构成即在正交偏光镜下，由无数细小晶粒构成的切面的干涉色使之始终明亮）

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式,晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
水铝氧石(氢氧铝石,三水铝石)$Al(OH)_3$ 单斜	$N_p=1.566\sim1.568$ $N_m=1.566\sim1.568$ $N_g=1.587\sim1.589$ $N_g-N_p=0.021$ $(+)2V=0°\sim40°$	晶形似云母,呈平行(001)的假六方板状、片状、鳞片状及土状等,{001}解理极好	薄片中无色,因含杂质染成褐色	低正突起	长条状切片斜消光,消光角随温度变化	一级顶部二级底部	{001}或{130}聚片双晶常见,延性可正可负	—	与高岭石区别为具较高的双折射率,与白云母区别为正光性,斜消光,双折射率较低。注:光性方位随温度变化
镁铁闪石(Mg,Fe^{2+}),$(Si_4O_{11})_2(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.635\sim1.665$ $N_m=1.644\sim1.675$ $N_g=1.655\sim1.698$ $N_g-N_p=0.020\sim0.030$ $(+)2V=65°\sim90°$	呈平行板状或放射状的柱状、纤维状集合体,{110}解理完全,两组解理交角≈55°	褐色,薄片中无色到浅褐色,富铁变种具微弱多色性	中—高正突起	在⊥(010)的纵切面上平行消光,其他纵切面上斜消光	最高Ⅱ级黄	{100}简单双晶或聚片双晶,沿柱面方向为正延性	—	该矿物以其薄片无色或浅色,常为拉长的或纤维状的晶体和其产状为特征(产于结晶片岩和接触片岩中)。其正光性可与透闪石、镁闪石、直闪石区别。直闪石为平行消光,不具双晶。阳起面折射率较低,负光性
透闪石$Ca_2Mg_5$$(Si_4O_{11})_2(OH,F)_2$ 单斜	$N_p=1.599\sim1.619$ $N_m=1.612\sim1.630$ $N_g=1.622\sim1.640$ $N_g-N_p=0.021\sim0.023$ $(-)2V=83°\sim86°$	呈长柱状、针状、纤维状或石棉状集合体,{110}解理完全,并常发育{100}裂理	白色或浅灰色,薄片中无色	中正突起,随含铁量增多而增高	横切面对称消光,除⊥(010)的具平行消光外,其他纵面为斜消光	横切面为Ⅰ级黄白,纵切面最高为Ⅱ级橙黄	{100}简单双晶或聚片双晶常见,沿柱面方向为正延性	—	其与硅灰石相混,但透闪石具角闪石解理,交角<60°,而硅灰石>60°,前者正延性,硅灰石延性可正可负;前者干涉色可达Ⅱ级橙黄,2V极大,后者不超过Ⅰ级,2V中等。透闪石与阳起石在成分上、光性上逐渐光渡,但前者无色,后者浅绿色

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 $2V$	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
阳起石 $Ca_2(Mg,Fe^{2+})[Si_4O_{11}](OH,F)_2$ 单斜	$N_p=1.619\sim1.688$ $N_m=1.630\sim1.697$ $N_g=1.640\sim1.705$ $N_g-N_p=0.021\sim0.027$ $(-)2V=65°\sim83°$	呈沿 C 轴延伸的长柱状、针状，集合体纤维状、放射状，{110}解理完全，并常有{100}裂理	鳞绿，暗绿及黄褐等色，薄片常浅绿色，有时无色（色随铁含量增加而加深）	中—高正突起，折射率随铁含量而增高	横切面对称消光，⊥(010)的纵切面为平行消光，其余纵切面为斜消光	Ⅰ级顶部到Ⅱ级中部	常见{100}简单或聚片双晶，沿柱面方向为正延性	—	其易与绿色普通角闪石相混，但阳起石色浅，多色性弱，折射率略低于普通角闪石，后者呈黑色、绿色或褐色，多色性强
普通角闪石 $(Ca,Na)_{2\sim3}(Mg,Fe^{3+},Al)_5[(Al,Si)_4O_{11}]_2(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.620\sim1.681$ $N_m=1.630\sim1.691$ $N_g=1.638\sim1.701$ $N_g-N_p=0.081\sim0.020$ $(-)2V=53°\sim85°$	沿 C 轴呈长柱状、杆状、针状、短柱状、纤维状，有时具环带构造，可含某些矿物小包裹体，{110}完全，有{001}裂理	墨绿—黑色，薄片具绿色和褐色两种（前者含 Fe^{2+}，后者含 Fe^{3+}），有强多色性，有吸收性	中—高正突起，折射率随含Fe量增多而增高	横切面对称消光，⊥(010)纵切面平行消光，其余纵切面斜消光	最高Ⅱ级底部，但常受矿物颜色影响而不易识别	{100}简单或聚片双晶较常见，横切面上双晶缝平行菱形的长对角线，沿晶体延长向正延性。	—	长柱状，强多色性，横切面具角闪石式解理，纵切面仅见一个方向解理，斜消光，消光角一般小于25°，正延性，负光性，是其重要鉴定特征
钠闪石 $Na,Fe_3^{2+},Fe_2^{3+},(Si_4O_{11})_2(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.654\sim1.701$ $N_m=1.662\sim1.711$ $N_g=1.668\sim1.720$ $N_g-N_p=0.014\sim0.016$ $(-)2V=80°\sim90°$	长柱状或斜状、纤维状，有时构成集合体，青石棉是其纤维状变种，角闪石式{110}解理完全	深蓝—黑色薄片中蓝色具黄绿—蓝—深蓝的特殊多色性	高正突起	多数纵切面斜消光，⊥(010)的纵切面平行消光，消光角 $N_p\wedge C$ 较小，常小于5°	Ⅰ级灰白—黄橙色，但因矿物色干扰呈蓝色，不易分辨	{100}简单双晶较少见，沿柱状或解理方向为负延性	无	钠闪石具特征的颜色、多色性和相反的吸收性，双折射率低，负延性。易于与非碱性闪石相区别。与霓石区别在于其具角闪石式解理，折射率与双折射率低。与电气石相混时其延长方向(N_p)为很浓的深蓝色

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
蓝闪石 $Na_2Mg_3Al_2$ $[Si_4O_{11}]_2$ $(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.606\sim1.661$ $N_m=1.622\sim1.667$ $N_g=1.627\sim1.670$ $N_g-N_p=$ $0.008\sim0.022$ $(-)2V=0°\sim50°$	长柱状、粒状、纤维状或放射状集合体，横断面为六边形或菱面体，角闪石式{110}解理完全	深蓝—黑色薄片中蓝或紫色，多色性显著	中正突起，折射率随 Fe^{3+} 的增多与 Al 的减少而增高	多数纵切面斜消光，横切面对称消光，⊥(010)纵切面为平行消光	通常为Ⅰ级，但常因蓝色干扰而不易辨别	有{100}简单双晶，但很少见，沿晶延长方向或解理方向为正延性	无	其与钠闪石相近，但前者为正延性，双折射率较大，后者为负延性，消光角较大
钠铁闪石 $Na^3Fe_4^{2+}Al$ $(Si_4O_{11})_2$ $(OH,F)_2$ 单斜	$N_p=1.674\sim1.709$ $N_m=1.67\sim1.709$ $N_g=1.686\sim1.710$ $N_g-N_p=$ $0.006\sim0.012$ $(-)2V=30°\sim70°$	短柱状或平行(010)的板状，{110}解理完全，有{010}裂理	蓝至黑色，薄片黄绿、褐绿、灰绿、灰紫等色，多色性显著	高正突起	多数纵切面斜消光，消光角小，最大20°左右，⊥(010)纵切片平行消光，难完全消光	Ⅰ级灰—黄，且常受矿物色干涉混淆	{100}简单或聚片双晶，少见，沿解理方向为负延性	—	其与钠闪石极相似，但前者消光角略大，2V 较小负延性，折射率与消光角均较小，而后者则不同之
异极矿 $Zn_4[-Si_2O_7]$ $(OH)H_2O$ 斜方	$N_p=1.614$ $N_m=1.617$ $N_g=1.636$ $N_g-N_p=$ 0.022 $(+)2V=46°$	晶体呈细小的板状，常见为皮壳状、钟乳状、纤维状、束状或粒状集合体，解理{110}完全，{101}稍差	黄褐、绿、浅蓝、白等色，薄片中无色	中正突起	平行消光	Ⅱ级底部	{001}双晶，正延性	—	强色散，晶形特征，主要为产于铅锌矿床氧化带的次生氧化物为其特征

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
天青石 $SrSO_4$ 斜方	$N_p=1.622$ $N_m=1.624$ $N_g=1.631$ $N_g-N_p=0.009$ $(+)2V=51°$	沿(001)发育呈板状,或沿a、b轴呈柱状,或呈页片状、土状,常见细粒状或纤维状集合体,解理{001}完全,{210}清楚	白色、浅蓝色并带有红绿、褐色,薄片无色,蓝色者具微弱多色性	中正突起	平行消光	低,最高Ⅰ灰白色。	非常罕见,正延性	—	其与重晶石相似,但其双折射率低,2V略大,其与硬石膏区别是它的解理与硬石膏的三组假正方解理不同,折射率与双折射率均比硬石膏的大
硅灰石 $Ca[SiO_3]$三斜	$N_p=1.616\sim1.640$ $N_m=1.628\sim1.650$ $N_g=1.631\sim1.653$ $N_g-N_p=0.013\sim0.014$ $(-)2V=38°\sim60°$	晶体沿b轴呈长柱状、针状、杆状、板状、纤维状、放射状,集合体可见横切面呈近四方形,解理{100}完全,{001}中等	白色略带浅灰、浅红,薄片中无色透明,含FeO多时呈浅黄多色性	中正突起,折射率随Fe^{2+}增加而增大	平行b轴切片近平行消光,垂直b轴者为斜消光	Ⅰ级橙黄色,柱面上略低,为Ⅰ级灰白至黄白	{100}简单双晶,有时为聚片双晶,因切片方向不同延性可正可负	—	其与透闪石相似,但后者具角闪石式解理,消光角小,双折射率高,2V极大。硅灰石为典型的高温接触变质矿物
红柱石 $Al_2[SiO_4]O$ 斜方	$N_p=1.629\sim1.642$ $N_m=1.633\sim1.646$ $N_g=1.638\sim1.653$ $N_g-N_p=0.009\sim0.011$ $(-)2V=71°\sim86°$	沿c轴呈斜方柱状,横切面呈近正方形,或呈杆状、束状、纤维状,多呈不规则粒状,晶体中含十字状碳质者称空晶石,解理{110}完全	常带浅肉红色、灰色、白、黄、红、紫色,略带多色性	中正突起,折射率与双折射率随Fe^{3+}量而增大	平行消光,横切面平行消光,某些斜切C轴切面为斜消光	Ⅰ级灰白—黄色	双晶罕见,负延性	—	其与硅线石区别是它的干涉色低,2V大,光性,延性相反;蓝晶石为斜消光;顽火辉石为正延性;方柱石的突起较低,多产于泥质岩与花岗岩的接触带中,亦见于泥质的结晶片岩中

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
重晶石 $BaSO_4$ 斜方	$N_p=1.636$ $N_m=1.637$ $N_g=1.648$ $N_g-N_p=0.012$ $(+)2V=37°$	呈沿(001)的板状,或沿a、b轴的柱状,也见有球状、纤维状、粒状、鲕状、土状者。解理{001}完全,{210}较完全,{010}清楚,薄片中易见二组相交解理	白、灰色多见,浅黄、浅绿、浅蓝者亦有。薄片无色透明,有时具微弱多色性	中正突起	平行消光	低,最高Ⅰ级橙黄	有{110}聚片双晶,正延性	—	相对密度大,两组解理常见,干涉色低,中等光轴角是其主要特征,天青石的折射率略低,2V略大;与硬石膏区别是其折射率高,双折射率低很多
绿脆云母 $Ca(Mg,Al)_2[(Al_2,Si)O_{10}](OH)_2$ 单斜	$N_p=1.643\sim1.649$ $N_m=1.655\sim1.660$ $N_g=1.655\sim1.661$ $N_g-N_p=0.012$ $(-)2V=2°\sim40°$ (一般17°)	假六方板状,假菱面体或为片状、聚片状,{001}解理完全	无色或黄绿、红褐色,薄片中无色或浅黄绿色,多色性显著	中正突起	平行消光	Ⅰ级黄白	双晶结合面为(001),双晶轴(310),有时可见三连晶正延性	—	与云母类相似,区别为云母双折射率和干涉色较高无脆性,而硬度较低,绿泥石的双折射率较低,色散较强,白云母的折射率较小,双折射率较大,无色
珍珠云母 $CaAl_2[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ 单斜	$N_p=1.630\sim1.638$ $N_m=1.643\sim1.648$ $N_g=1.644\sim1.650$ $N_g-N_p=0.012\sim0.014$ $(-)2V=40°\sim70°$ (一般45°)	假六方板状、片状,常呈细状、片状、鳞片状集合体,{001}解理完全	珍珠白色,微带浅灰、浅黄、浅红色,薄片一般无色,可呈浅褐绿色	中正突起,折射率随Na代换Ca而降低,但双折射率增高	近于平行消光	Ⅰ级黄至橙黄	(001)双晶轴[310],正延性	—	它与白云母和滑石的区别在折射率较高而干涉色较低,与绿泥石区别在双折射率较高而无颜色。绿泥石和硬绿泥石是绿色多色性,硬绿泥石具正光性、负延性,折射率较大,也与珍珠云母不同

(三)二轴晶矿物

矿物名称 (分子式、晶系)	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
硬绿泥石 $(Fe^{2+},Mg,Mn)_2$ (Al,Fe^{3+}) $Al_2O_3(SiO_4)_2$ $(OH)_4$ 单斜，三斜	$N_p=1.713\sim1.728$ $N_m=1.719\sim1.734$ $N_g=1.723\sim1.740$ $N_g-N_p=$ $0.010\sim0.012$ $(+)2V=36°\sim72°$	呈假六方片状，但完整晶体少见，常见半自形、他形晶体，也可见束状、片状、放射状集合体，解理{001}完全，{110}中等	绿黄或暗绿色，薄片中无色至绿色，多色性显著	高正突起	倾斜消光，$N_g\wedge C=5°\sim25°$	Ⅰ级橙红色	{001}简单双晶，三连晶，聚片双晶常见，负延性	—	有特殊的多色性，高正突起，低干涉色，常具聚片双晶和强的色散为鉴定特征
镁橄榄石 $Mg_2[SiO_4]$ 斜方	$N_p=1.635\sim1.640$ $N_m=1.651\sim1.660$ $N_g=1.670\sim1.680$ $N_g-N_p=$ $0.035\sim0.040$ $(+)2V=80°\sim90°$	常为不规则粒状，有时为短柱状、长柱状，晶形好者两端呈锐角，常见不规则裂纹，{100}、{011}不完全	一般无色或白、浅绿、浅黄、柠檬黄色，薄片中无色	高正突起，糙面显著	平行消光	Ⅱ级顶部	双晶不常见，可正可负		其与透辉石区别在于后者具两组近直交的完全解理，斜消光，2V较小；镁橄榄石无解理，平行消光，2V较大；同铁橄榄石相比，镁橄榄石的折射率较小，2V较大
橄榄石 $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$ 斜方	$N_p=1.657\sim1.694$ $N_m=1.674\sim1.715$ $N_g=1.692\sim1.732$ $N_g-N_p=$ $0.037\sim0.041$ $(\pm)2V=-83°\sim88°$	晶体沿 c 轴呈短柱状，常呈粒状集合体，常具不规则裂纹	橄榄绿色，遭侵蚀即变为黄褐或红色，薄片中无色	高正突起，糙面显著	平行消光	Ⅱ级顶部到Ⅲ级底部	双晶不常见，可正可负		与斜方辉石区别是双折射率高，平行消光，一般无解理，后者具辉石式完全解理，且具微弱多色性，斜消光，正延性。普通辉石式解理。斜消光，双折射率低，硅镁石则有无色至淡黄色多色性，2V及折射率较低
铁橄榄石 $Fe_2[SiO_4]$ 斜方	$N_p=1.805\sim1.835$ $N_m=1.838\sim1.877$ $N_g=1.847\sim1.886$ $N_g-N_p=$ $0.042\sim0.051$ $(-)2V=47°\sim54°$	呈短柱状或平行(100)的板状、块状，颗粒较细，一般不见解理	绿黄色，当铁氧化时，染成红褐至黑色，薄片中呈浅黄色，具多色性	极高正突起	平行消光	可达Ⅲ级顶部	{100}少见，延性可正可负		与其他橄榄石区别是折射率与双折射率高，光轴角较小，负光性；同浅色的辉石的区别是铁橄榄石双折射率高，平行消光，解理不发育

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及 $2V$	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
顽火辉石(顽辉石) $Mg_2Si_2O_6$ 斜方	$N_p=1.657\sim1.667$ $N_m=1.659\sim1.672$ $N_g=1.665\sim1.677$ $N_g-N_p=0.008\sim0.010$	沿C轴呈短柱状、粒状,少数呈板状。解理{110}、{110}完全。横断面交角87°、93°,纵切面见一组解理	白、灰、绿黄色,薄片中无色透明	中正突起	横切面对称消光,纵切面平行消光	低,最高不超过Ⅰ级浅黄色	双晶少见,正延性		根据其平行消光,干涉色低,可与所有单斜辉石区别。与紫苏辉石区别在于无色与正光性。与硅灰石区别为横断面具两组近正交的解理,而无硅灰石的{101}解理,硅灰石的光轴角较小
古铜辉石 $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ 斜方	$N_p=1.667\sim1.689$ $N_m=1.672\sim1.698$ $N_g=1.677\sim1.702$ $N_g-N_p=0.010\sim0.013$ $(+)2V=85°\sim90°$ $(-)2V=65°\sim80°$	晶体呈柱状、纤维状,{110}与{110}两组柱面解理近直交	灰绿、绿褐色,由于含较多的金属矿物包裹体呈似古铜色,薄片中无色,弱多色性	高正突起	纵向片平行消光,横断面对称消光	最高为Ⅰ级黄	{100}简单及聚片双晶,正延性		以其光性、平行消光和弱多色性为特征。红柱石则折射率较低,负延性。蓝晶石则为斜消光不同于古铜辉石。
紫苏辉石 $(Mg,Fe)Si_2O_6$ 斜方	$N_p=1.689\sim1.711$ $N_m=1.698\sim1.724$ $N_g=1.702\sim1.727$ $N_g-N_p=0.010\sim0.016$ $(-)2V=45°\sim65°$	短柱状、板状或粒状,{110}与{110}两组解理完全,交角88°,沿解理面常有定向排列的铁质包裹体	绿、黑绿至黑褐色,薄片呈淡绿色,弱多色性	高正突起	横断面上对称消光,柱面、轴面平行消光	Ⅰ级橙黄至红色	{100}简单及聚片双晶,与单斜辉石形成类似聚片双晶的细小连晶,正延性		与单斜辉石的区别在于其特殊的多色性、较低的干涉色、平行消光或对称消光和负光性。它与红柱石的多色性相近,区别在于前者为正延性,后者为负延性,而且红柱石表面的多色性分布不均匀,二者产状也有别
透辉石 $CaMg[Si_2O_6]$ 单斜	$N_p=1.665\sim1.699$ $N_m=1.672\sim1.706$ $N_g=1.696\sim1.728$ $N_g-N_p=0.029\sim0.031$ $(+)2V=60°\sim63°$	呈轴面发育的短柱状,集合体不规则粒状或放射状。{110}完全,{110}∧{110}≈87°,有{100}、{001}裂理	白、浅绿或暗绿色,薄片中无色,铁含量不同会产生多色性	高正突起	斜消光,横断面上对称消光,(010)面斜消光,⊥(010)的纵面平行消光	具鲜艳的Ⅱ级干涉色	{100}或{001}的简单或聚片双晶		与普通辉石相近,区别:①手标本较后者色浅,后者色绿黑、黑色;②(100)及(010)较后者发育,后者(110)发育,故前者断面近四边形,后者八边形;③前者双折射率较高,后者较低;④前者最大消光角常在40°以下,后者在40°以上

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
普通辉石 (Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)[(Si,Al)$_2$O$_6$] (Si,Al)$_2$O$_6$ 单斜	N_p=1.671~1.743 N_m=1.672~1.750 N_g=1.694~1.772 N_g-N_p=0.024~0.029 (+)2V=42°~60°	短柱状，集合体常为半自形至他形粒状，横断面常近八边形，解理同透辉石	绿黑至黑色，薄片中无色、浅褐色或浅黄，富Fe、Ti者具弱多色性	高正突起	横断面对称消光，多数纵切片上斜消光，⊥(010)的纵切面平行消光	Ⅰ级顶部到Ⅱ级中部	双晶同透辉石		它与角闪石区别是后者折射率较低，解理夹角不同(56°)，具明显多色性，消光角较小，且为负光性，它与透辉石区别见上。与橄榄石区别是前者有辉石式解理，干涉色较低，柱面上有解理，斜消光等
霓石(钠铁辉石) Na,FeSi$_2$O$_6$ 单斜	N_p=1.750~1.770 N_m=1.780~1.820 N_g=1.800~1.836 N_g-N_p=0.040~0.060 (−)2V=60°~70°	长柱状或针状晶体，具辉石式的八边形或四边形断面，柱端锥形者称锥辉石，解理同透辉石	暗绿至绿黑色，薄片中浅绿、暗绿至黄绿色，多色性较强	极高正突起，糙面显著	(010)上斜消光，消光角较小，横断面上对称消光，(100)面平行消光	Ⅲ级至Ⅳ级以上，被本身颜色所掩盖	{100}简单或聚片双晶，常见负延性		霓石以其特殊的多色性、负光性、近于平行消光，可与其他辉石相区别
锂辉石 LiAl[Si$_2$O$_6$]单斜	N_p=1.651~1.668 N_m=1.660~1.671 N_g=1.800~1.836 N_g-N_p=0.013~0.025 (+)2V=55°~80°	短柱状，或平行(100)的板状，晶面常具纵条纹，结晶粗大，{110}及{110}交角87°	无色、灰白、浅紫、浅绿、浅黄、紫色，无色较厚的薄片，有时见多色性	高正突起	在(010)面上斜消光，横切面上对称消光或(100)面上为平行消光	Ⅰ级顶至Ⅱ级中部	{100}双晶，常见		在单斜辉石类中锂辉石的消光角最小，和其他单斜辉石不难区别，它与透闪石的区别是具辉石式解理，并具正光性，透辉石的消光角较大，而锂辉石2V较小

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
硅线石(矽线石) $Al_2[SiO_4]O$ 斜方	$N_p=1.654\sim1.661$ $N_m=1.658\sim1.662$ $N_g=1.673\sim1.683$ $N_g-N_p=0.019\sim0.022$	长柱状、针状、纤维状,两端不具晶面,常见束状、放射状或毛发状集合体,{010}解理完全	常为无色或白色,也有黄、褐、绿色,薄片中无色,片厚则有弱多色性	中—高正突起	平行消光	最高Ⅱ级蓝绿,横切面很低,暗灰色	正延性		与红柱石的区别是延性相反(红柱石负延性),双折射率强,2V小,正光性,其与透闪石很相似,但后者具闪石式解理,斜消光,负光性,2V大
菱锶矿 $SrCO_3$ 斜方	$N_p=1.516\sim1.520$ $N_m=1.664\sim1.667$ $N_g=1.666\sim1.669$ $N_g-N_p=0.149\sim0.150$	常呈针状、纤维状或长柱状、捅状或粒状,{110}解理清楚	无色或灰黄、淡苹果绿、浅灰、淡黄等色,薄片中无色	低负—中正突起	平行消光	高级白色,但因 N_g-N_m 小,底切片干涉低	{110}双晶常见,也见聚片双晶,负延性		其以清晰的解理、较大的相对密度以及光轴面的位置(平行(010))与文石区别。毒重石($BaCO_3$)则有较高的折射率,菱锶矿烧之可显红色火焰
绿帘石 $Ca_2(Al,Fe)_3[SiO_4][Si_2O_7]O(OH)$ 单斜	$N_p=1.715\sim1.751$ $N_m=1.725\sim1.784$ $N_g=1.734\sim1.797$ $N_g-N_p=0.019\sim0.046$ $(-)2V=60°\sim90°$	沿 B 轴呈柱状,断面呈六边形,也有粒状集合体,放射状集合体少见,{001}解理完全	黄绿、黄、灰等色,随含 Fe 量高而色深,薄片中黄绿色,多色性显著	高至极高正突起,糙面显著	柱面平行消光,断面斜消光	Ⅱ—Ⅲ级鲜艳干涉色,当双折射率很低时也可出现不太明显的异常干涉色	{100}不常见,可正可负		极高正突起,多色性显著,平行消光和具较小消光角的斜消光,较高干涉色,光轴面垂直延长方向,负光性为其鉴定特征
文石(霰石) $CaCO_3$ 斜方	$N_p=1.530\sim1.533$ $N_m=1.681\sim1.682$ $N_g=1.685\sim1.686$ $N_g-N_p=0.155\sim0.156$ $(-)2V=18°$	针状或柱状,断面假六边形,或呈厚板状、钟乳状、纤维状,{010}解理不完全	无色或白色、淡黄、淡绿色,薄片中无色	明显的闪突起,N_g 高正,N_p 高负突起	柱面平行消光	珍珠状高级白干涉色	结合面{110}成聚片状,六方轮状复合双晶,负延性		文石极不稳定,易转变为方解石。与方解石、白云石的区别是相对密度较大,折射率较高,无菱面体解理,二轴晶,平行消光,在热 $Co(NO_3)_2$ 溶液中可被染成紫色

(三)二轴晶矿物

矿物名称（分子式、晶系）	折射率及 2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
斧石 $(O,Mn,Fe)_3Al_2BO_3[Si_4O_{12}](OH)$ 三斜	$N_p=1.678\sim1.687$ $N_m=1.685\sim1.695$ $N_g=1.688\sim1.698$ $N_g-N_p=0.009\sim0.011$ $(-)2V=55^\circ\sim81^\circ$	一般呈尖劈状、刃片状，故得名，也可呈粒状，{100}解理完全	白、灰、黄、褐和蓝色，一般为丁香紫褐色，薄片中无色或浅紫黄色，多色性极弱，但厚的薄片中可见多色性	高正突起	斜消光	最高Ⅰ级黄，有时略有异常	双晶少见		手标本中以丁香褐的颜色、楔状的外形为特征，薄片中高正突起，低干涉色，楔状晶形及较厚的薄片中有较特殊的多色性为特征
蓝晶石 $Al_2[SiO_4]O$ 三斜	$N_p=1.706\sim1.718$ $N_m=1.714\sim1.723$ $N_g=1.719\sim1.734$ $N_g-N_p=0.012\sim0.016$ $(-)2V=82^\circ\sim83^\circ$ （富含 Cr 者，N_g 达 1.766）	沿 C 轴呈柱状，沿(100)呈板状，有时呈放射状集合体，{100}解理完全，有{001}裂理	蓝至白色，也有灰、绿、黄及黑色者，薄片中无色到浅蓝色，具弱多色性	高正突起	斜消光，最大消光角可达30°，但在(001)面上，沿{100}解理近于平行消光	最高达Ⅱ级蓝，一般Ⅰ级黄橙或黄白或灰白色	常为简单或聚片双晶，正延性		与矽线石区别是特征的，{001}裂理斜消光，双折射率小，2V 大，负光性，双晶发育，与红柱石区别是色蓝，正延性，聚片双晶
蔷薇辉石 $(Mn,Fe,Ca)[SiO_3]$ 三斜	$N_p=1.711\sim1.738$ $N_m=1.716\sim1.741$ $N_g=1.723\sim1.752$ $N_g-N_p=0.012\sim0.014$ $(+)2V=58^\circ\sim76^\circ$	呈平行(001)的厚板状或粒状，一般呈致密粒状集合体，{110}解理完全，{001}解理差	玫瑰红色，薄片中无色略带橙粉色，较厚的薄片可有多色性	高正突起	斜消光，消光角较小	最高Ⅰ级橙黄色	有{010}聚片双晶不常见，正或负延性		粉红色，两组解理完全，消光角较小的斜消光为其特点

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
一水硬铝石(硬水铝石，水铝石) AlO(OH)斜方	$N_p=1.702\sim1.704$ $N_m=1.722\sim1.724$ $N_g=1.750\sim1.752$ $N_g-N_p=0.048$ $(+)2V=84^\circ\sim85^\circ$	呈平行(010)的薄片状晶体，有时沿C轴延伸成柱状，{010}解理完全，{110}次之	白、灰、浅黄、浅蓝色等，薄片中无色，有时呈浅蓝色	高正突起，糙面显著	平行消光	可达Ⅲ级顶部	负延性		该矿物据其高的突起、高的双折射率及干涉色易于识别。其为与水铝氧石并生成为铝土矿的主要成分
十字石 $(Fe^{2+},Mg,Zn)(Al,Fe^{3+})_9O_6[SiO_4]_4(O,OH)_2$ 斜方	$N_p=1.739\sim1.747$ $N_m=1.745\sim1.753$ $N_g=1.752\sim1.762$ $N_g-N_p=0.013\sim0.014$ $(+)2V=79^\circ\sim90^\circ$	呈短柱状，粒状晶体，断面六边形，{010}解理差	暗褐、红褐、黄褐色，薄片中黄色，多色性弱	高正突起，糙面显著	柱面平行消光，横断面对称消光	Ⅰ级黄至Ⅰ级红	双晶面为{032}、{232}的贯穿双晶，呈十字形或斜十字形，薄片中少见，正延性		金黄色多色性，高突起为其鉴定特征
独居石 $(Ce,La,Nd,Th)PO_4$ 单斜	$N_p=1.774\sim1.800$ $N_m=1.777\sim1.801$ $N_g=1.825\sim1.849$ $N_g-N_p=0.049\sim0.051$ $(+)2V=6^\circ\sim19^\circ$	呈自形粒状小晶体，晶体呈平行(100)的板状、叶片状，或沿B轴延伸的柱状，{001}解理完全，{100}中等	黄、褐、红褐色，薄片中黄或无色，多色性很弱	极高正突起，糙面显著	斜消光，消光角极小，最大不超过10°	很高，Ⅳ级以上，横断面干涉色极低	双晶面{100}常见，沿{001}的聚片双晶少见，正延性		亮黄色，正突起和双折射都很高，多色性不明显是其鉴定特征，锆石有更高的折射率，无完好解理，并为一轴晶与之区别
榍石 $CaTi[SiO_4](O,OH,Cl,F)$ 单斜	$N_p=1.843\sim1.950$ $N_m=1.870\sim2.034$ $N_g=1.943\sim2.110$ $N_g-N_p=0.100\sim0.192$ $(+)2V=17^\circ\sim40^\circ$	晶体常呈信封状，无菱状、楔状，薄片中常见菱形或双楔形断面，{110}解理较完全	无色或黄、绿、褐黑色，薄片中无色至浅黄褐色或淡绿色，有的呈多色性	极高正突起，糙面显著	斜消光，但通常不易得到真正的消光位	高级白，因矿物干扰带微褐色，不易完全消光	常见{110}简单双晶		菱形或双楔形断面，极高突起，明显糙面，高级白干涉色和极强色散为鉴定特征

(三)二轴晶矿物

矿物名称(分子式、晶系)	折射率及2V	晶形、解理	薄片中颜色	突起	消光类型	干涉色	双晶、延长符号	光性异常	鉴定特征及其他
孔雀石 $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ 单斜	$N_p=1.655$ $N_m=1.875$ $N_g=1.909$ $N_g-N_p=0.254$ $(-)2V=43°\sim44°$	针状、柱状、纤维状丛生为簇晶放射状、皮光状及同心带状，有{201}、{010}解理	孔雀绿色，薄片中绿色、黄绿色，多色性弱	极高正突起	斜消光	高级白干涉色，但因矿物本身影响又呈绿色	{100}双晶常见，常成穿插双晶，有时呈聚片双晶		以其孔雀绿色，纤维斜消光和极大的双折射率以及产状(氧化次生带)为主要特征
斜锆石 ZrO_2 单斜	$N_p=2.136$ $N_m=2.236$ $N_g=2.243$ $N_g-N_p=0.107$ $(-)2V=30°±$	沿(100)呈板状，或沿B轴延长	无色或黑色薄片中褐至无色，有多色性	极高正突起	斜消光	极高，可达Ⅳ级	{100}或{110}双晶，有时为聚片双晶，板状晶体，正延性		斜锆石与锆石的区别为突起更高，斜消光，二轴晶负光性。针铁矿、纤针铁矿则为红色，针铁矿为平行消光。纤铁矿的双折射率较大，锡石、金红石为一轴晶正光性
易解石 (Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb)$_2$(O,OH)$_6$ 斜方	$N_p=2.27\sim2.28$ $N_m=2.27\sim2.38$ $N_g=2.34\sim2.41$ $N_g-N_p=$ 0.06± $(±)2V=75°±$	板柱状、板状、针状、块状，集合体为束状	黑、褐、黄、紫红、浅棕色，薄片中棕、红棕色，多色性显著	极高正突起	平行消光	常呈均质性，$N=2.14\sim2.18$，但加热后可恢复非均质性			详细鉴定需加热后进行化学分析、差热分析和X光测定
板钛矿 TiO_2 斜方	$N_p=2.581\sim2.583$ $N_m=2.584\sim2.586$ $N_g=2.700\sim2.741$ $N_g-N_p=$ $0.177\sim0.158$ $(+)2V=0°\sim30°$	呈平行(100)的板状、锥状或柱状，{110}解理差	黄褐、红褐或褐黑色，薄片中黄褐或金褐色，多色性弱	极高正突起，糙面极显著	有时见异常干涉色，不能真正消光	极高，呈高级白色	双晶难见		特殊的光性，极高的折射率和双折射率，异常强的色散(色散极强)为其重要鉴定特征

附录3　常见硅酸盐工艺矿物光性鉴定简表

矿物名称	化学成分（化学式）	晶系	折射率			晶形	颜色	解理	干涉色	消光	光性	光轴角	附注
			N_g	N_m	N_p								
α-石英（低温石英）	SiO_2	三方	（N_e）1.553		（N_o）1.544	柱状、粒状	无色透明	—	一级灰白色	平行消光	一轴晶正光性	0	573℃以下稳定
β-石英（高温石英）	SiO_2	六方	（N_e）1.540		（N_o）1.532	柱状及双锥状	无色透明	—	一级灰白色	平行消光	一轴晶正光性	0	573～870℃稳定
α-方石英（低温变体）	SiO_2	四方	（N_o）1.487		（N_e）1.484	假正方形粒状	无色	—	一级灰弱		一轴晶负光性	—	80～270℃以下，具蜂窝状结构，存在于硅砖及腐蚀硅砖外壳中
β-方石英（高温变体）	SiO_2	等轴		（N）1.490		假正方形粒状	无色透明	—	—	—	均质	—	1470～1710℃存在于硅砖中及腐蚀硅砖外壳方石英带
γ-鳞石英（低温型）	SiO_2	斜方或假六方	1.478		1.469	假六方片状、矛头状	无色透明	—	一级灰白	平行消光	二轴晶正光性	$2V=35°\sim45°$	为鳞石英低温变种，硅砖中的主要组成矿物，117℃以下稳定，呈矛头状双晶特征
β-鳞石英	SiO_2	假六方				六角片状	无色透明	—	一级灰白				117～163℃稳定
α-鳞石英（高温型）	SiO_2	六方				六方片状	无色透明	—	一级灰白				870～1470℃稳定，高温鳞石英
硅灰石（低温型）	β-$CaSiO_3$	单斜	1.631	1.629	1.616	柱状、板状、放射状、针状	无色透明	{110}完全，{001}次之	低，最高一级，橙黄	平行或斜消光	二轴晶负光性	$2V=39°$	存在于玻璃"石质"或硅砖中，1160℃转为α型
假硅灰石（高温型）	α-$CaSiO_3$	假六方	1.654		1.610	柱状、板状、放射状、针状	无色透明	{100}完全，{001}次之		平行消光	二轴晶负光性	极小	1160℃以上形成

矿物名称	化学成分（化学式）	晶系	折射率			晶形	颜色	解理	干涉色	消光	光性	光轴角	附注
			N_g	N_m	N_p								
三钙硅（基性钙石）	$3CaO \cdot SiO_2$	六方	1.723		1.718	六方形、板状、柱状	无色透明	—	浅灰或深灰	平行消光	一轴晶负光性	0	常为硅酸盐水泥主要组成矿物，并存在于炉渣中
β-二钙硅（β-正硅钙石）	$2CaO \cdot SiO_2$	斜方	1.735		1.717	粒状、圆状	淡黄、棕黄或无色	两组	蓝、黄、微红色		二轴晶正光性	大	水泥、炉渣中，一般有特征的双晶，675～1420℃稳定
γ-二钙硅（低温型）	$2CaO \cdot SiO_2$	单斜	1.654	1.645	1.642	柱状	淡黄、棕黄或无色	柱状，一组解理	蓝、黄、微红色	消光角小	二轴晶正光性	大	存在于水泥和炉渣中，675℃以下稳定
α-二钙硅（高温型）	$2CaO \cdot SiO_2$	单斜或三斜	1.737	1.720	1.715	柱状	淡黄，棕色或无色	{100}	蓝、黄、微红色		二轴晶正光性	大	存在于水泥和炉渣中，1420～2130℃稳定
莫来石（富铝红柱石）	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	斜方	1.654 1.682	1.644	1.642 1.661 （1%～3%Fe_2O_3+$TiCO_2$）	针状、柱状	无色，有时具多色性	{010}	一级黄或灰，最高达二级蓝	平行消光	二轴晶正光性正延性	45°～50°	为陶瓷制品、高铝砖、粘土砖的主要组成矿物，砖的腐蚀带中莫来石的晶体增大，呈网状结构
蓝晶石	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	三斜	1.728	1.722	1.713	板状	无色至浅蓝色	{100}完全，{010}次之	达一级红	斜消光，消光角小	二轴晶负光性	82°	耐火材料矿物
硅线石	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	斜方	1.677～1.684	1.658～1.670	1.657～1.661	针状、柱状、纤维状	无色透明	{010}	达二级蓝	平行消光，对称消光	二轴晶正光性	25°～30°	耐火材料矿物
红柱石	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	斜方	1.643	1.639	1.634	针状、纤维状、柱状切面为方形	无色透明	{110}完全	一级黄	平行消光，横切面对称消光	二轴晶负光性	84°	耐火材料矿物

矿物名称	化学成分（化学式）	晶系	折射率			晶形	颜色	解理	干涉色	消光	光性	光轴角	附注
			N_g	N_m	N_p								
铁橄榄石	$2FeO \cdot SO_2$	斜方	1.886	1.877	1.835	不规则片状	淡黄、黄褐色	{010}不完全	二级黄橙	平行解理消光	二轴晶负光性	47°	存在于硅砖、硅砖腐蚀带及硅酸盐材料中
钙镁橄榄石	$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	斜方	1.655～1.669	1.646～1.662	1.641～1.651	不规则片状，具多角性	无色或绿色	{011}不完全	二级	平行解理消光	二轴负晶	75°～80°	存在于硅砖、高硅砖腐蚀带、铬镁砖、硅镁制品中
铁橄榄石	$2MgO \cdot SiO_2$	斜方	1.680～1.670	1.660～1.651	1.640～1.635	不规则片状	无色，有时具多色性	{010}不完全	二级	平行解理或其外形消光	二轴晶负光性	85°～90°	存在于镁砖及铬镁砖、镁质硅酸盐制品中
霞石（低温型）	$NaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	六方	（N_o）1.537		（N_e）1.533	六方柱粒状	无色	{010}不完全	一级灰	平行消光	一轴晶负光性	0	存在于玻璃"石质"耐火砖腐蚀中，1280℃以上稳定
卡内奇石（α型高温）	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	1248℃以上为等轴，687℃转为三斜	1.514	1.510	1.509	片状	无色		一级灰		二轴晶负光性	15°	具有特征的复杂的聚片双晶，1280℃以上稳定
白榴石	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$	假等轴	1.599	—	1.508	八角形切面	无色	—	微弱	波浪式消光现象	近均质		存在于玻璃"石质"中
钠长石	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	三斜	1.539	1.532	1.528	片状、长条状	无色	{001}完全，{010}次之	一级灰黄	斜消光，消光角＝12°～19°	二轴晶正光性	72°～82°	具聚片双晶，与钙长石呈类质同象固溶体

矿物名称	化学成分（化学式）	晶系	折射率			晶形	颜色	解理	干涉色	消光	光性	光轴角	附注
			N_g	N_m	N_p								
正长石	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	单斜	1.526	1.524	1.519	板状、片状	无色	{001}完全，{010}清楚	一级灰	斜消光{010}5°～12°，{001}为平行消光	二轴晶负光性	67°～72°	常见于耐火砖腐蚀带，具有简单双晶
钙长石	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	三斜	1.589	1.583	1.573	片状、柱状	无色	{001}完全，{010}次之	一级灰黄	斜消光35°～38°	二轴晶负光性	77°	具有聚片双晶
铝黄长石	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	四方	（N_o）1.669	—	（N_e）1.658	板状、柱状、片状	无色	{001}清楚	一级灰及二级蓝色	平行消光	一轴晶负光性	0	铝黄长石与镁黄长石的呈固溶体
镁黄长石	$2CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	四方	（N_e）1.638	—	（N_o）1.631	板状、柱状、片状	无色或淡黄色	{001}清楚	一级灰及二级蓝色	平行消光	一轴晶正光性	0	铝黄长石与镁黄长石呈固溶体
脱玻石（失秀石）	$Na_2O \cdot 3CaO \cdot 6SiO_2$	斜方	1.579	1.570	1.561	针状、锥状、球颗粒	无色	一组	低	平行消光	二轴晶正光性	75°	常存于玻璃"石质"中
透辉石	$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	单斜	1.695	1.671	1.665	针状、柱状	无色至黄色	{110}完全，二组交角87°	二级	斜消光	二轴晶正光性	59°	存在于钙镁硅酸盐制品、腐蚀砖及"玻璃石质"中
普通辉石	$Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si)_2O_6$	单斜	1.714	1.702	1.696	柱状	黄至棕黄	{110}完全，二组交角87°	二级	斜消光，消光角45°～54°	二轴晶正光性	58°～62°	存在于钙镁硅酸盐制品、腐蚀砖及"玻璃石质"中

矿物名称	化学成分（化学式）	晶系	折射率			晶形	颜色	解理	干涉色	消光	光性	光轴角	附注
			N_g	N_m	N_p								
堇青石	$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	假六方（斜方）	1.522	1.522	1.519	柱状断面为六边形	无色，薄片厚时具多色性	{010}不完全，(001)有裂开	一级	平行消光	二轴晶可正可负	中到小	具有复杂双晶，存在于玻璃质或耐火材料中
刚玉（α型）	α-Al_2O_3	三方	（N_o）1.770	—	（N_e）1.760	柱状、板状、粒状	无色或有多色性		二级	平行消光	一轴晶负光性	0	高铝硅酸盐制品中的主要组成矿物
β-氧化铝	$Na_2O \cdot 11 \sim 12Al_2O_3$	六方	（N_o）1.668 1.678	—	（N_e）1.630 1.640	片状、板状、柱状	无色		二级较高	平行消光	一轴晶负光性	0	
γ-氧化铝	Al_2O_3	等轴	—	1.736	—	方形、片状、八面体	无色				均质		
铬铁矿	$(Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)_2O_4$	等轴	—	(N) 2.07～2.16	—	粒状、八面体	黑色，边绿呈棕色	—	—	—	均质		为铬镁（铁）硅酸制品中的主要组成矿物
尖晶石	$(Mg,Fe)(Al,Cr)_2O_4$	等轴	—	(N) 1.72～1.78	—	八面体，切面为菱形	无色至绿色、棕色	—	—	—	均质		常在耐火材砖中可见无色透明镁尖晶石
磁铁矿	Fe_3O_4	等轴				粒状、八面体，切面为三角形、菱形	黑色，不透明	—	—	—	均质		为腐蚀砖外的黑色不透明铁矿物
方镁石	MgO	等轴	—	(N) 1.738～1.760	—	粒状	无色，淡黄	二组解理正交	—	—	均质		为镁砖和铬镁砖中的主要组成矿物
氧化钙	CaO	等轴	—	(N) 1.837	—	粒状	无色	二组解理	—	—	均质		见于水泥与炉渣等中

参考文献

1 潘兆橹．结晶学与矿物学．北京：地质出版社，1992

2 李德惠等．晶体光学．北京：地质出版社，1992

3 南京化工学院，清华大学，华南工学院等．陶瓷材料研究法．北京：中国建筑工业出版社，1980

4 李家驹．陶瓷工艺学．北京：中国轻工业出版社，1999

5 南京化工学院，华南工学院，清华大学主编．陶瓷物理化学．北京：中国建筑工业出版社，1981

6 沈威等．水泥工艺学．武汉：武汉工业大学出版社，1991

7 杜海清，唐绍英．陶瓷原料配方．北京：中国轻工业出版社，1984

8 素木洋一著．硅酸盐手册．刘达权，陈世光译．北京：中国轻工业出版社，1982

9 田煦等．非金属矿产地质学．武汉：武汉工业大学出版社，1991

10 邵国有等．硅酸盐岩相学．武汉：武汉工业大学出版社，1996

11 王成兴．硅酸盐矿物原料基础知识．北京：中国轻工业出版社，1984

12 曹春娥．硅酸盐岩相学实验．南昌：江西高校出版社，2002